

LA ACTIVIDAD EXPERIMENTAL COMO UNA ALTERNATIVA PARA LA
CONSTRUCCIÓN DE EXPLICACIONES EN TORNO AL FENÓMENO DE
ENTRELAZAMIENTO A PROPÓSITO DEL CONCEPTO DE LOCALIDAD

XIOMY LORENA ZAMUDIO CIFUENTES

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
LICENCIATURA EN FÍSICA
BOGOTÁ D. C.

2020

LA ACTIVIDAD EXPERIMENTAL COMO UNA ALTERNATIVA PARA LA
CONSTRUCCIÓN DE EXPLICACIONES EN TORNO AL FENÓMENO DE
ENTRELAZAMIENTO A PROPÓSITO DEL CONCEPTO DE LOCALIDAD

XIOMY LORENA ZAMUDIO CIFUENTES

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE LICENCIADA EN FÍSICA

ASESOR: MAURICIO ROZO CLAVIJO

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA Y LA RELACIÓN FÍSICA
MATEMÁTICA

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
LICENCIATURA EN FÍSICA
BOGOTÁ D. C.

2020

Tabla de contenido

Introducción	iv
Capítulo I.....	1
Contextualización del trabajo de investigación.....	1
1.1 Contexto problemático	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Pregunta problema.....	3
1.4 Objetivo general	3
1.5 Objetivos específicos.....	3
1.6 Justificación.....	3
1.7 Metodología.....	4
1.8 Antecedentes	5
1.9 Marco teórico general.....	6
Capitulo II	9
El papel de la actividad experimental en la enseñanza de la física y en particular de la mecánica cuántica	9
2.1 La necesidad de la teoría cuántica y a qué responde	13
2.2 La importancia de la actividad experimental para la enseñanza de la mecánica cuántica.....	18
Capitulo III	22
Sobre el entrelazamiento cuántico	22
3.1 El problema de la medición en la mecánica cuántica.....	22
3.2 Entrelazamiento.....	24
3.3 El debate Einstein-Bohr y la paradoja EPR.....	28
3.3 Localidad desde la perspectiva relativista y su relación con EPR.....	33
3.4 Propuesta experimental a propósito del caso EPR	40
3.4.1 Descripción de las actividades experimentales	42
Conclusiones	54
Referencias	56
Apéndice A: Cartilla: Estados Entrelazados.....	57

Introducción

La mecánica cuántica nace a finales del siglo XIX en respuesta a problemas que no fueron resueltos desde el contexto de la física clásica. Un ejemplo de esto surge cuando Planck postuló en 1900 que la energía absorbida o emitida por la materia no era continua, es decir, no se puede absorber o emitir cualquier cantidad de energía sino que se transfiere en unidades elementales de energía, cuantos de energía o fotones. Esta idea, le permitió a Planck construir una explicación para el fenómeno del espectro de radiación emitido por un cuerpo negro ya que no había justificación desde el contexto de la física clásica.

Desde su origen, la mecánica cuántica ha sido fuente de acalorados debates. Un ejemplo muy importante es el famoso debate entre Albert Einstein y Niels Bohr con respecto a su interpretación de esta teoría cuántica. Pero en 1935, Einstein pensó haber encontrado el talón de Aquiles de la mecánica cuántica, algo tan extraño, tan contrario a las concepciones lógicas del universo que pensó que tenía la clave para probar que la teoría estaba incompleta.

Un elemento clave en esta discusión es el célebre artículo “*Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*” que Einstein publicó, junto con Boris Podolsky y Nathan Rosen en ese año (Gurvich, 2016). En el artículo, Einstein hace una crítica directa a la mecánica cuántica y propone una serie de criterios para demostrar que, a pesar de que la teoría no es incorrecta, está incompleta porque no todas las cosas pueden observarse o predecirse con certeza. Por una parte, Einstein creía que no existían señales que pudieran transmitirse instantáneamente o “acciones fantasmales” como las llamó, sino que en su lugar, todas las variables estaban determinadas mucho antes de medirlas. Por otro lado, Bohr si creía en esas acciones fantasmales, afirmaba que las partículas podrían vincular sus resultados aleatorios de forma instantánea incluso a grandes distancias de separación.

En particular, Einstein no era partidario de las acciones instantáneas a distancia como lo predice la mecánica cuántica, dicho fenómeno es conocido como el *Entrelazamiento Cuántico*. En ese momento, para Einstein, no era concebible que la información entre partículas pudiese viajar más rápido que la velocidad de la luz ya que representaba una contradicción con la teoría de la relatividad.

Dicha problemática suscito en Einstein y otros pensadores un conjunto de preguntas en relación con la completitud de la mecánica cuántica, un ejemplo a estas preguntas es, sí la mecánica cuántica es una teoría local. ¿Será que se puede construir explicaciones a interrogantes como este a partir de actividades experimentales y los efectos que se evidencian en estas?

Desde el trabajo de investigación se propone una perspectiva fenomenológica en donde la actividad experimental tiene un enfoque cualitativo y un papel de vital importancia en la apropiación de conceptos. Bajo esta perspectiva, la actividad experimental es comprendida como el espacio que le permite a los estudiantes hacer diferentes interpretaciones alrededor del fenómeno para explicarlo. El estudiante formaliza una noción cuando construye un conjunto de palabras que caracterizan aspectos o cualidades de los efectos observados. Estas actividades pueden ser una alternativa de aprendizaje para que los estudiantes logren la ampliación de su experiencia y la formalización de fenomenologías, en este caso particular, la construcción de explicaciones que nos lleven a la noción de entrelazamiento cuántico.

(Rozo, Walteros, & Cortés, 2019, pág. 197), mencionan que la actividad experimental es de gran importancia para la enseñanza de la mecánica cuántica ya que es entendida como “la estrategia que le permite al estudiante desarrollar habilidades y maneras de proceder para el análisis del fenómeno, permitiéndole construir y reconstruir argumentos para dar cuenta de este”.

Bajo este contexto, se espera que haya una construcción de explicaciones en torno al fenómeno, ya que, en general, en la enseñanza de la física moderna y en particular de la mecánica cuántica se suele considerar que, en comparación con los tópicos de la física clásica, los conceptos de la mecánica cuántica están demasiado alejados de las percepciones de los estudiantes. Estos conceptos modernos desafían ciertas nociones de la realidad que hemos creado a partir de las observaciones cotidianas que tenemos del mundo a escala macroscópica. Sin embargo, existen razones para pensar que el comportamiento del mundo atómico y subatómico tiene diferentes maneras de conocer, siendo este, un hecho que por sí solo justifica incluirlo en la enseñanza (Fanaro M. D., 2009).

Dado lo anterior, el trabajo se desarrollará en tres capítulos:

- Capítulo 1: Contextualización del trabajo de investigación

- Capítulo 2: El papel del experimento para la enseñanza de la física y en particular de la mecánica cuántica
- Capítulo 3: Sobre el entrelazamiento cuántico

En el primer capítulo se pretende contextualizar al lector, esto con el propósito de mostrar a grandes rasgos la propuesta que se irá desarrollando a lo largo del documento. En este capítulo se consignan los objetivos generales y específicos del trabajo, el planteamiento del problema y su contexto, la justificación y la metodología que se llevará a cabo para la investigación.

En el capítulo 2, se aborda la importancia de la relación teórico-experimental como una relación constitutiva, ya que al igual que la teoría, las actividades experimentales también contribuyen a la construcción de conocimiento. De igual forma se hará una distinción entre el enfoque cualitativo y cuantitativo y sus respectivas características. Por otra parte, se evidenciarán argumentos y algunos ejemplos en relación con el nacimiento de la mecánica cuántica y la necesidad de un nuevo esquema que explique el comportamiento de los fenómenos a nivel atómico y subatómico, además de mostrar el papel que juega la actividad experimental en la enseñanza de la física y en particular de la mecánica cuántica y cómo esta es considerada desde la perspectiva fenomenológica.

En el tercer capítulo, se hará una interpretación del artículo de Einstein, Podolsky y Rosen del año 1935, en donde los autores enlistan una serie de argumentos en contra de Bohr y la interpretación de Copenhague, entre ellos el fenómeno de entrelazamiento, para afirmar que la mecánica cuántica es una teoría incompleta. Adicionalmente se abordará, el problema de la medición y la localidad desde la perspectiva relativista y su relación con el fenómeno de entrelazamiento.

Para finalizar el documento, se plantea una actividad experimental preliminar y una principal, desde las cuales se pueden establecer relaciones que permiten construir una explicación entorno a los efectos que subyacen del entrelazamiento cuántico. Se espera que con la propuesta, los estudiantes puedan construir una base conceptual que logre un acercamiento a este interesante fenómeno.

Capítulo I

Contextualización del trabajo de investigación

1.1 Contexto problemático

Desde su origen, la mecánica cuántica ha sido fuente de importantes debates. Un ejemplo muy importante es el famoso debate entre Albert Einstein y Niels Bohr con respecto a su interpretación de esta teoría cuántica. En 1935, Einstein pensó haber encontrado el talón de Aquiles de la mecánica cuántica, algo tan extraño, tan contrario a las concepciones lógicas del universo que pensó que tenía la clave para probar que la teoría estaba incompleta. Este argumento fue el fenómeno de entrelazamiento cuántico.

El contexto problemático de la investigación está enmarcado en el artículo original de Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*, en donde el entrelazamiento se plantea como el fenómeno de un sistema formado por una pareja de partículas que provienen de una fuente común y que están entrelazadas mediante un estado único que involucra a las dos partículas del sistema.

El entrelazamiento hace que las medidas realizadas sobre una partícula parezcan estar influyendo instantáneamente en las de su compañera, es decir, que alguna influencia se tendría que estar propagando entre las partículas a pesar de la separación entre ellas, es por eso que podemos inferir las propiedades físicas de una partícula con respecto a la otra.

Abordando la problemática desde la relatividad, Einstein hace referencia al principio de localidad, en el sentido de que, la interacción entre un sistema de dos partículas tiene lugar sólo dentro del cono de luz de una de ellas. La interacción entre el sistema de partículas sólo puede viajar máximo a la velocidad de la luz, es decir, se pueden afectar las partículas siempre y cuando se encuentren dentro del cono de luz.

Por otro lado, la no-localidad implica que una de las partículas se encuentra fuera del cono de luz de la otra dando lugar a interacciones que viajan a una velocidad mayor a la velocidad de la luz. EPR, plantea el entrelazamiento como un argumento para mostrar que la mecánica cuántica es una teoría incompleta, puesto que los autores aseguraban que el entrelazamiento predicho por

la mecánica cuántica es inconsistente con el principio de localidad debido a que no se puede afectar una partícula que se encuentre fuera de su propio cono de luz.

En particular, Einstein no era partidario de las acciones instantáneas a distancia como lo predice la mecánica cuántica. Para Einstein, no era concebible que la información entre partículas pudiese viajar más rápido que la velocidad de la luz ya que representaba una seria contradicción con la teoría de la relatividad.

1.2 Planteamiento del problema

El artículo de EPR es de suma importancia ya que generó gran impacto en la comunidad científica debido a que se estaba debatiendo en torno a la completitud de la mecánica cuántica y las implicaciones físicas del fenómeno de entrelazamiento que estaría violando el segundo postulado de la teoría de la relatividad que Einstein tanto defendía.

Desde la publicación del artículo de 1935, se ha podido mostrar experimentalmente que, por muy extraño que parezca, el fenómeno de entrelazamiento es real, este se ha comprobado para fotones y electrones separados por kilómetros de distancia, incluso entre la tierra y un satélite (Yin, 2017). Los físicos en las últimas décadas han mostrado grandes avances en aplicaciones de este fenómeno como por ejemplo, la computación cuántica y la teleportación, que de seguro serán muy importantes para la construcción de nuevas tecnologías.

A pesar de que el descubrimiento del entrelazamiento ha generado una gran revolución científica, el problema es que aún sigue siendo un fenómeno desconocido en otros contextos distintos a la física. Es por esta razón, que el trabajo de investigación pretende realizar un análisis en torno al fenómeno y su contexto problemático y, por otro lado, pretende buscar una estrategia para llevarlo a otros ámbitos de las ciencias naturales a nivel universitario. Se busca familiarizar a los estudiantes en relación con nuevas maneras de conocer el mundo y de acercarse a la explicación de la naturaleza física de este tipo de fenómenos.

De acuerdo con lo anterior, se hace necesario buscar formas alternativas para construir explicaciones sobre este fenómeno. En ese sentido, el trabajo de investigación propone actividades experimentales que permiten apreciar los efectos derivados del entrelazamiento cuántico. Estas actividades serán el puente para la construcción de una base conceptual que le ayudará a los estudiantes a comprender el fenómeno.

Es importante destacar, que las actividades experimentales propuestas se realizarán a partir de una perspectiva fenoménica, desde donde se establece que las explicaciones deben estar en términos de lo que se observa, lo cual está estrechamente ligado con la forma en que los estudiantes construyen su explicación. Por lo tanto, se puede afirmar que las actividades experimentales desde esta perspectiva generan la ampliación de la experiencia y dinamizan la teorización de ésta, es decir, pone en juego los criterios y las formas de conocer que tiene los estudiantes para transformar su experiencia (Malagón, Sandoval, & Ayala, 2013)

1.3 Pregunta problema

Con la problemática abordada anteriormente surge la siguiente pregunta:

¿Cómo a partir de una actividad experimental se puede contribuir a que los estudiantes construyan una explicación en torno al fenómeno de entrelazamiento cuántico?

1.4 Objetivo general

Proponer una actividad experimental como estrategia para que los estudiantes construyan explicaciones en torno al fenómeno de entrelazamiento cuántico y sobre el concepto de localidad.

1.5 Objetivos específicos

- Hacer una revisión bibliográfica de textos y artículos en torno a la problemática propuesta.
- Indagar sobre el papel del experimento desde una perspectiva fenomenológica para la enseñanza de la física y en particular de la mecánica cuántica.
- Analizar la crítica hecha a la teoría de la mecánica cuántica y el fenómeno de entrelazamiento desde el artículo de Einstein, Podolsky y Rosen de 1935.
- Elaborar una cartilla-taller que recopile la actividad experimental propuesta y los aspectos más relevantes del trabajo de grado.

1.6 Justificación

La física y en general las ciencias naturales encierran en sí mismas un elevado valor cultural para la comprensión del mundo moderno desarrollado tecnológicamente. Estamos atravesando por nuevas teorías que dan explicación a nuestra realidad física y que configuran nuestra forma de pensar, esta es una razón muy valiosa para buscar estrategias de enseñanza que permitan conocer

esta nueva física y a la vez, contribuir a sus explicaciones y procesos de divulgación para la sociedad.

En ese sentido, para el trabajo de investigación, se hace pertinente abordar fenómenos de la física moderna como el entrelazamiento cuántico con el propósito de llevarlo a otros contextos con estudiantes universitarios de las carreras de ciencias naturales. Se propone realizar un análisis del fenómeno a partir de actividades experimentales que representen una forma alternativa de construir explicaciones sobre el mundo físico a nivel atómico.

Bajo ese contexto, se hace preciso proponer experimentos cualitativos (ver capítulo 3, sección 4) ya que han sido parte fundamental de los procesos de formación de conceptos, es decir, que se ha llegado a comprender los fenómenos físicos sin la necesidad de realizar mediciones o toma de datos cuantitativos. Lo anterior no quiere decir que se desacredita el trabajo en el cual la medición de variables está presente, lo que se busca es mostrar que realmente estamos inmersos en un mundo en el cual la carga experimental contribuye en la comprensión y construcción de conceptos.

Por otro lado, en el curso de mecánica cuántica de la Licenciatura en física, no se aborda el fenómeno de entrelazamiento cuántico dado que, muchas veces el tiempo destinado para el curso no es suficiente y no existe material en el departamento que permita a los docentes en formación realizar un estudio con más detalle respecto al fenómeno junto con actividades experimentales y sus implicaciones conceptuales.

1.7 Metodología

La metodología que se aborda está enfocada en una perspectiva fenomenológica con las siguientes fases:

- **Primera Fase:** Revisión bibliográfica de textos y artículos a nivel local, nacional e internacional en torno a la problemática con el propósito de fortalecer las bases conceptuales.
- **Segunda Fase:** Indagar sobre el papel del experimento para la enseñanza de la mecánica cuántica, planteando actividades experimentales con el propósito de brindar a los estudiantes estrategias alternativas para la construcción de explicaciones en torno al fenómeno de entrelazamiento cuántico.

- **Tercera Fase:** Análisis del contexto problemático en torno al artículo de EPR con el fin de indagar sobre los criterios planteados por los autores para demostrar que la teoría de la mecánica cuántica era una teoría incompleta y que el entrelazamiento no cumplía con el principio de localidad desde la perspectiva relativista.
- **Cuarta Fase:** Elaboración de una cartilla-taller con el propósito de mostrar las actividades experimentales como alternativa de enseñanza para abordar los efectos cuánticos relacionados con el entrelazamiento. Este material podrá ser implementado en el curso de mecánica cuántica y otros cursos introductorios en la universidad con estudiantes de ciencias naturales.

1.8 Antecedentes

A partir de la búsqueda sobre trabajos referentes a la problemática planteada, se encontró a nivel local los siguientes trabajos de grado:

- **Actividades experimentales para la construcción de explicaciones alrededor de los fundamentos básicos de la mecánica cuántica de Luz Angélica Walteros Rodríguez:**

Con la intención de proponer una estrategia de enseñanza-aprendizaje de la mecánica cuántica, el trabajo plantea una serie de actividades experimentales que permiten evidenciar el comportamiento de la luz, lo cual les permite a los estudiantes construir una imagen y explicación en torno a su comportamiento, evidenciando además, la manera de proceder en la formalización de la explicación de los conceptos de estado y principio de superposición. De este trabajo de grado se pudo obtener grandes aportes con relación a la importancia que tiene la actividad experimental para la enseñanza de la mecánica cuántica y la formalización y organización de las propuestas experimentales que hace la autora para la comprensión de los fenómenos.

- **Un análisis del fenómeno de teleportación de estados cuánticos con propósitos educativos de Camilo Florián Barón:**

En esta monografía, se hace un análisis conceptual del fenómeno de la teleportación de estados cuánticos como un proceso de metacognición del autor. Realiza la construcción del concepto de superposición desde el contexto clásico y cuántico y aborda fenómenos como el de interferencia y entrelazamiento cuántico, todo esto con el fin de generar bases conceptuales que le permitieron indagar acerca de la novedosa idea del reaparecimiento de la información, la teleportación cuántica. De este trabajo de grado se

obtuvo explicaciones conceptuales en torno al fenómeno de entrelazamiento cuántico y algunos ejemplos de actividades experimentales que han demostrado la existencia de este fenómeno a lo largo de las últimas décadas.

Por otra parte, a nivel internacional se encontró el siguiente trabajo de tesis doctoral:

- **La enseñanza de la mecánica cuántica en la escuela media de María De Los Ángeles Fanaro de la Universidad de Burgos en España:** Esta tesis doctoral aborda el problema de la enseñanza de los conceptos fundamentales de la mecánica cuántica en la escuela media. La autora elabora una estructura conceptual relacionada con el enfoque de los caminos múltiples de la mecánica de Feynman y analiza y fundamenta la transición entre la mecánica cuántica y la clásica. Uno de los resultados del trabajo es la construcción de material didáctico para enseñar nociones cuánticas como lo son, estado, principio de superposición y correspondencia, entre otros. Este material se implementó en un curso de física de último año en la escuela media y se analizaron los resultados registrando la totalidad de las clases en formato de audio y recogiendo todas las producciones escritas de los estudiantes. De esta investigación, se pudo extraer elementos de carácter pedagógico como por ejemplo, la importancia de enseñar la mecánica cuántica y las razones por las cuales los educadores se resisten a enseñarla en la escuela y en los cursos introductorios en la universidad.

1.9 Marco teórico general

Algunos de los autores principales en los cuales se basará el trabajo de investigación para abordar el contexto pedagógico serán: (Hodson, 1994) y (Malagón, Sandoval, & Ayala, 2013).

(Hodson, 1994) en su artículo “Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio” plantea algunos de los beneficios alrededor del papel que tienen las actividades experimentales en la enseñanza de la Física. De este artículo se recogen cinco categorías por las cuales los docentes hacen uso de las actividades experimentales en el aula:

- Una estrategia para estimular el interés por la ciencia.
- Una estrategia para propender por habilidades de experimentación
- Una estrategia para intensificar el aprendizaje de los conocimientos científicos.
- Una estrategia para proporcionar ideas sobre el método científico
- Una estrategia para desarrollar determinadas actitudes científicas.

Estas categorías son pertinentes para el trabajo de investigación debido a que aportan elementos para realizar una reflexión en torno al papel que juega la actividad experimental para la enseñanza de la física y en particular, de la mecánica cuántica.

Por otro lado, del artículo “La actividad experimental: construcción de fenomenologías y procesos de formalización” de (Malagón, Sandoval, & Ayala, 2013), se recogen tres puntos importantes para situar la perspectiva fenomenológica en el trabajo de investigación. El primer punto, tiene que ver con el carácter exhibido y constructivo del fenómeno, esto quiere decir que cuando hacemos interpretaciones para la comprensión de una fenomenología, implica que debemos organizar nuestras experiencias y observaciones con el fin de hacer una descripción detallada del fenómeno. El segundo punto, hace referencia a que el fenómeno se presenta tal y como es, no esconde nada detrás de sí, el fenómeno es sencillamente lo que parece. Y del tercer punto se recoge que, el fenómeno no es estático, por el hecho de que este aparece ante diferentes observadores, si el observador cambia, el fenómeno también lo hace a medida que se van haciendo distintas organizaciones, este se transforma y, por lo tanto, es pertinente reiterar la relación entre los modos de hacer y de hablar en la experiencia.

Con respecto a la problemática en el contexto de la mecánica cuántica, algunos de los autores principales que se abordarán en el trabajo de investigación son: (Dirac, 1958), (Einstein, Podolsky, & Rosen, 1935), (Rosenblum & Kuttner, 2016), (Kumar, 2008) y (Greene, 2004).

Se realizará un análisis en torno al artículo de (Einstein, Rosen, & Podolsky, 1935) Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? En este artículo Einstein plantea que los elementos de la realidad física no pueden ser determinados por consideraciones filosóficas a priori, pero deben ser encontrados por los resultados de experimentos y mediciones. Esto no es una condición necesaria, sino es simplemente una condición de la realidad y ese criterio está de acuerdo con las ideas clásicas. El objetivo del trabajo de EPR fue mostrar que la mecánica cuántica no puede ser considerada una descripción completa de la realidad física. Es por esta razón que del artículo se recogen los argumentos en los cuales se basaron EPR para atacar la predicción e interpretación de la mecánica cuántica hecha por Bohr y su escuela de Copenhague.

(Kumar, 2008) en su libro “Quantum: Einstein, Bohr And The Great Debate About The Nature Of Reality” también realiza un análisis entorno al artículo EPR y la concepción de realidad

que generaba debate entre Einstein y Bohr. De este libro se logra recoger el contexto histórico del fenómeno de entrelazamiento, la forma de pensamiento de Einstein y la escuela de Copenhague y algunas ejemplificaciones que ayudan a comprender el comportamiento cuántico en relación con el fenómeno de entrelazamiento.

Por otra parte, del libro “Principios de Mecánica Cuántica” de (Dirac, 1958) se recogieron las bases conceptuales y matemáticas para interpretar los fenómenos de las actividades experimentales que se proponen en el último capítulo y también se recopilan ideas importantes en torno a la mecánica como una nueva teoría y sus interpretaciones para responder al comportamiento de los fenómenos microscópicos. El libro “El enigma cuántico” de (Rosenblum & Kuttner, 2016) que también se encarga de hacer explicaciones y ejemplificaciones de los fenómenos microscópicos, aportó al trabajo de investigación bases conceptuales, ilustraciones y diferentes modelos de actividades experimentales para comprender el fenómeno de entrelazamiento cuántico y sus diferentes implicaciones.

Por último, del libro “The Fabric of the Cosmos: Space, Time, and the Texture of Reality” del físico (Greene, 2004) se recogió una amplia e intuitiva explicación del fenómeno de entrelazamiento cuántico, los debates que ha generado en la comunidad científica, experimentos mentales que ilustran los efectos del fenómeno y, principalmente, su relación con la teoría de la relatividad especial y algunos conceptos como la separabilidad y realidad de la naturaleza física.

Capítulo II

El papel de la actividad experimental en la enseñanza de la física y en particular de la mecánica cuántica

La enseñanza de la física debe permitir en el estudiante, la construcción de distintas visiones del mundo y la formación de nuevos valores y criterios acerca de su posición como individuo y ciudadano en torno al avance de la ciencia. Permitirá “un acercamiento a la comprensión del complejo mundo originado por el avance de la tecnología, las crisis sociales y políticas, las reformas religiosas y económicas, las transformaciones materiales y espirituales y las innovaciones de la bioingeniería, cibernética, informática, biofísica y telecomunicaciones, para nombrar sólo algunas áreas del conocimiento, las que repercuten en el comportamiento individual y colectivo de una sociedad” (Burbano, 2001, pág. 56).

La enseñanza de la física debe ser una herramienta para construir un conocimiento más elaborado, sistemático y científico. Para transformar nuestra forma de pensamiento pasivo a uno más crítico y estructurado, todo esto con el fin de formar ciudadanos íntegros que participen y produzcan de la ciencia para el desarrollo de la cultura científica y la sociedad.

Ahora bien, la física al igual que las demás ciencias, se fundamenta en la creación de hipótesis, construcción de teorías y comprobación de éstas mediante experimentos, lo cual hace que estos últimos representen un aspecto fundamental para la enseñanza de la física (Ubaque, 2009). Es importante pensar en la relación teórico-experimental como una relación de constitución, ya que gracias al carácter experimental se evidencian efectos y con éstos se pueden construir explicaciones. Es habitual que en el aula de clase el docente aborde el aspecto teórico haciendo representaciones, esquemas y descripciones de los fenómenos para que los estudiantes lo visualicen. Esto no sucede con el aspecto experimental, puesto que muchas veces el docente no opta por realizar actividades experimentales que evidencien los efectos del fenómeno y esto hace que el proceso de enseñanza y aprendizaje de la física sea incompleto.

Por otra parte, en el siglo XVIII, se sugería que para elaborar una teoría científica se debía comenzar con la medición de datos cuantitativos, esto quiere decir que aún no se pensaba en la importancia del carácter experimental cualitativo para la construcción de explicaciones de los

fenómenos. “Tal como lo defendía Kuhn, pocas veces las mediciones precisas desempeñan un papel crucial en el descubrimiento de leyes científicas o incluso en la contratación de teorías” (Ferreiros & Ordoñez, 2002, pág. 62). Esto pone de manifiesto que la experimentación cuantitativa como cualitativa son igualmente válidas para el estudio de los fenómenos físicos. En ese sentido, se hace pertinente mostrar las características que diferencian los experimentos cualitativos de los cuantitativos:

Los experimentos desde el enfoque *cuantitativo* pretenden verificar hipótesis con el tratamiento estadístico de datos, la operacionalización de variables, la construcción de instrumentos de medición y procedimientos matemáticos, es decir, se cuantifica lo que se observa (Ramirez, Martinez, & Fernandez, 2010). Predomina la búsqueda de información objetiva ya que no representa interés otros factores en la experimentación como el contexto y las consideraciones subjetivas que tienen los observadores.

Por otro lado, los experimentos desde el enfoque *cualitativo* (Ramirez, Martinez, & Fernandez, 2010, pág. 16) mencionan que “entre las características más notables se encuentran las de considerar: la realidad como múltiple, construida y holística de carácter dinámico, por lo que, no sería posible determinar verdades únicas, predecir y controlar los hechos como en la investigación convencional cuantitativa. El objetivo se dirige a la comprensión de los fenómenos y el significado que tiene para los sujetos que intervienen en el proceso educativo”. Aquí, es importante resaltar que las interpretaciones procedan de los estudiantes y no de los docentes o investigadores ya que el propósito es que ellos construyan explicaciones que les ayude a conceptualizar su experiencia.

En el enfoque cualitativo es relevante el contexto social y cultural de los estudiantes ya que cada uno construye un significado de acuerdo con su experiencia. Las hipótesis surgen en el desarrollo de la actividad experimental, debido a que no se quiere llegar a verdades universales y generalizaciones, sino a proposiciones concretas y específicas.

Una vez discutido en torno a la relación teórico-experimental y las características de los experimentos cuantitativos y cualitativos, es preciso dirigir la discusión alrededor del papel que tienen las actividades experimentales en la enseñanza de la Física.

(Hodson, 1994, pág. 300) menciona cinco categorías por las cuales los docentes hacen uso de las actividades experimentales y de los beneficios que pueden derivarse de los mismas:

- Una estrategia para estimular el interés por la ciencia.
- Una estrategia para propender por habilidades de experimentación
- Una estrategia para intensificar el aprendizaje de los conocimientos científicos.
- Una estrategia para proporcionar ideas sobre el método científico
- Una estrategia para desarrollar determinadas actitudes científicas.

En la primer categoría, (Hodson, 1994) hace referencia a las actividades experimentales como estimulantes, ya que resultan ser un método activo para que haya mayor interacción entre los docentes y estudiantes, logrando así, una actividad experimental muchas veces al gusto del estudiante y que permite cambiar la cotidianidad de cómo se abordan los conceptos físicos en la clase. Adicional a esto, los estudiantes siempre tienen una gran disposición e interés por la ciencia, se muestran curiosos y construyen hipótesis con el fin de solucionar interrogantes.

La categoría de técnicas de experimentación es más bien un argumento para pensar críticamente acerca de cuáles habilidades enseñar, a favor de dejar claro a los estudiantes que algunas de estas técnicas permiten realizar otras actividades de aprendizaje útiles para su vida académica y cotidiana. Algunas de estas habilidades experimentales podrían ser: identificar los fenómenos y problemas propuestos, construir hipótesis, soluciones y gráficos, elaborar y diseñar actividades experimentales simples, medir magnitudes y cantidades y organizar y analizar datos, entre otras. Es importante aclarar que la carencia de determinadas habilidades no constituye una barrera para el aprendizaje.

Como tercera y cuarta categoría se tiene el aprendizaje de conocimientos científicos y métodos de la ciencia. La gran ventaja de las actividades experimentales radica en conseguir ciertos objetivos de aprendizaje que los otros métodos no se plantean (Hodson, 1994), esto quiere decir que estas actividades logran aprendizajes científicos diferentes de los adquiridos en una clase habitual de tablero con el maestro como expositor. Con las actividades experimentales, se logran plantear otros objetivos de aprendizaje como por ejemplo que los estudiantes construyan y formalicen conceptos a partir de las observaciones y explicaciones que tienen de un fenómeno.

Por otra parte, hay que procurar evitar que los estudiantes piensen que las actividades experimentales son una receta de cocina, que se trata solo de llevar a cabo una serie de pasos sin sentido y nada más. No se debería creer rotundamente en un solo método científico, dado que existen diferentes maneras de proceder y conocer, así que no existen un solo algoritmo que dirija las investigaciones. Es por esta razón, que el docente debe buscar el método que mejor se acomode a las necesidades de la actividad experimental para que ésta se realice con éxito. Uno de los propósitos más importantes radica en que comprendan el objetivo principal y los conceptos que subyacen de las actividades experimentales, de lo contrario, causarían confusión y se convertirían en una pérdida de tiempo.

Con respecto a la última categoría, (Hodson, 1994) define las actitudes científicas como un conjunto de enfoques respecto de la información, ideas y los procedimientos considerados importantes para los practicantes de la ciencia. Los estudiantes deben comprender que un científico puede ser sensible y divertido como lo puede ser cualquier otro profesional, no poseen características especiales aunque ellos mismos y los estudiantes lo creen. Las actividades experimentales y opiniones que tienen los científicos acerca de una fenómeno, no siempre tienen porque ser objetivas y cuantitativas, eso implica que debe tener una buena disposición para considerar las ideas o teorías de los otros también basándose en explicaciones o formalizaciones desde la experiencia.

Bajo ese contexto, cuando se realiza una actividad experimental, resulta más conveniente eliminar pasos que no son importantes y emplear técnicas más sencillas con el fin de que los estudiantes se preocupen más por los conceptos que subyacen del experimento y no por montar complejos aparatos que los agotan y los aburren. Cuando el estudiante identifica esos conceptos, busca y elabora explicaciones que dan cuenta de su significado, intenta formalizarlo con base a lo que observa. Es ahí donde el docente puede mostrar a los estudiantes que existen contradicciones e incongruencias que también han ayudado a la construcción de la ciencia y, es por esto, que el interés de las actividades experimentales no es centrarse en algo como lo único verdadero sino que pueden discernir y construir sus propios argumentos acerca de un fenómeno a partir de un enfoque más cualitativo.

Analizando los elementos que brinda (Hodson, 1994) al trabajo de investigación, podemos definir que la actividad experimental juega un papel fundamental para la enseñanza de la física ya que permite a los estudiantes formalizar los efectos que observan de los fenómenos y aplicar su experiencia y conocimientos para explicar la naturaleza. La actividad experimental permite que el estudiante tenga una visión de la física más práctica, real y ampliada de los fenómenos. Por un lado, el estudiante logra un entendimiento del método científico y una interpretación más completa del fenómeno, y por el otro, el maestro fortalece habilidades y ese interés asiduo por la ciencia con lo que presentara al estudiante una física más práctica y emocionante.

2.1 La necesidad de la teoría cuántica y a qué responde

En el último siglo se ha ido haciendo cada vez más evidente que la naturaleza actúa en un plano diferente a escala atómica. Sus leyes fundamentales no rigen el mundo directamente tal como este aparece en nuestra imagen mental, sino que actúan sobre un substrato del que ahora, en muchos casos, no podemos formarnos ninguna imagen mental sin cometer desaciertos.

En la mecánica clásica, las ideas fundamentales y las leyes que rigen su aplicación constituyen un esquema tan sencillo y elegante, que parece imposible modificarlo seriamente sin destruir todas sus atractivas características. Sin embargo, a lo largo de las últimas décadas, se ha logrado construir un nuevo esquema, llamado mecánica cuántica, más adecuado para interpretar los fenómenos a escala atómica y subatómica, y que es en ciertos aspectos más elegante y satisfactorio para dar respuesta a estos nuevos fenómenos en comparación con el esquema clásico (Dirac, 1958).

Ahora bien, “la necesidad de elegir un camino distinto al de la mecánica clásica viene exigida por los hechos experimentales” (Dirac, 1958, pág. 15), la teoría clásica es inconsistente con las observaciones y datos obtenidos. Una limitación de la mecánica clásica lo constituye el comportamiento de la luz, un ejemplo de esto es el efecto fotoeléctrico. Con la teoría de la electrodinámica clásica formulada por Maxwell, la visión ondulatoria de la luz alcanzó una gran aceptación en la comunidad científica.

Un experimento para estudiar el efecto fotoeléctrico consiste en dos placas metálicas paralelas dentro de una botella que se encuentra al vacío. Estas placas son conectadas a un

amperímetro y a una batería con un potenciómetro que permite variar el potencial entre las placas y su polaridad.

El experimento se lleva a cabo iluminando la superficie del cátodo (emisor), y como resultado se muestra una pequeña corriente eléctrica en el amperímetro. Si hay una lectura de corriente, entonces quiere decir que hubo transferencia de electrones de una placa a la otra. Luego de esto, se varía el potencial entre las placas, lo cual modifica la intensidad de la corriente medida por el amperímetro. Cuando este potencial se hace negativo, oponiéndose al movimiento de los electrones, se encuentra que existe un potencial de umbral para el cual no hay flujo de corriente (Rodríguez & Cervantes, 2006).

Algunas de las predicciones desde la teoría clásica para el efecto fotoeléctrico eran que la energía cinética de los electrones es proporcional a la intensidad de radiación, pues esta es la variable que caracteriza la energía total que transporta la onda electromagnética. Lo anterior quiere decir que, al aumentar la intensidad de la radiación, mayor es el potencial requerido para frenar el flujo de corriente (Arancibia & Cádiz, 2011).

Por otro lado, si la intensidad de la luz es muy pequeña comparada por ejemplo, con la energía que mantiene a los electrones ligados al material, entonces estos podían adquirir energía suficiente a partir de un determinado tiempo de exposición a la luz para ser emitidos y poder observar el efecto. En ese sentido, para cualquier valor de la frecuencia de la luz incidente, si la intensidad es suficientemente alta, entonces se emitirán electrones.

Sin embargo, este fenómeno resulto siendo una piedra en el zapato para la física clásica debido a que estos resultados experimentales estaban en completo desacuerdo con sus predicciones. Lo que realmente se observa es que los electrones de la placa son emitidos únicamente cuando la frecuencia de la radiación, supera cierto valor mínimo o frecuencia umbral. Para cada tipo de material, existe una cierta frecuencia mínima bajo la cual ningún electrón puede ser emitido.

En ese sentido, cuando se supera la frecuencia umbral, la energía de los electrones expulsados depende únicamente de la frecuencia de la luz, es decir, el voltaje de frenado está en función de la frecuencia y no de su intensidad. Esto generaba curiosidad en la comunidad científica

debido a que la luz de baja intensidad a determinada frecuencia podría emitir electrones. El efecto fotoeléctrico fue clave en el desarrollo del concepto dual de la naturaleza de la luz como se ha observado hasta ahora, ya que esta posee simultáneamente características de onda y partícula. Esto es imposible de comprender en términos de una descripción ondulatoria clásica de la luz. Las ideas desarrolladas a principios del siglo XX terminaron por derribar la concepción clásica de la luz y la materia, y fueron forjando el camino para el nacimiento de una nueva teoría de la naturaleza, la física cuántica.

Dado lo anterior, “la necesidad de apartarse de las ideas clásicas al intentar dar una explicación de la estructura de la materia se deriva no solo de los hechos establecidos experimentalmente sino también de razones filosóficas generales” (Dirac, 1958, pág. 17). En la interpretación clásica, la constitución de la materia está compuesta por un número de pequeñas partes y de las leyes que se postulan para esas pequeñas partes, se pueden deducir las leyes de toda la materia agrupada en general. Hacer esto no es válido porque la explicación quedaría incompleta, no se estaría haciendo una distinción entre el comportamiento microscópico y macroscópico de la materia. Por otro lado, la interpretación cuántica postula que cada una de estas pequeñas partes están constituidas por otras mucho más pequeñas, de las cuales debe explicarse su comportamiento. Es por esta razón, que no se puede construir explicaciones de lo “grande” en función de lo “pequeño”, se hace necesario entonces modificar las interpretaciones clásicas de modo que el tamaño adquiriera un carácter absoluto.

Un ejemplo que nos muestra la necesidad de definir lo “grande” de lo “pequeño” es el experimento de la doble rendija que propone (Feynman, 1971). Este arreglo experimental permite evidenciar esa barrera entre lo grande y lo pequeño, dado el comportamiento de las partículas ante la medición que realiza un observador sobre el sistema.

Este experimento consiste en un dispositivo que dispara objetos pequeños al azar, en este caso canicas. Estas son disparadas contra una lámina de hierro con una rendija (abertura) vertical por la que algunas canicas atravesarán y las que no, golpearán con la parte sólida de la lámina. Las canicas que atraviesan la rendija llegarán a una pantalla detectora en donde chocarán y dejarán la marca del impacto. Como solo se tiene una rendija, se espera que en la pantalla se dibuje una sola franja vertical de los impactos de las canicas. Ahora bien, si se añade una segunda rendija, lo más

lógico es que se observen dos franjas verticales a razón de las canicas que atravesaron y dejaron la marca del respectivo impacto.

Luego de disparar canicas, se hará una segunda prueba pero esta vez con ondas. Estas llegarán a la rendija, se propagarán e impactarán en la pantalla detectora donde nuevamente se dibujará una franja vertical de gran intensidad justo enfrente de la abertura. Si se añade una segunda rendija, ocurre algo distinto. Cuando dos ondas se cruzan en una determinada región del espacio se combinan de forma que hay regiones donde se refuerzan y otras donde se eliminan. Esto da lugar a lo que se conoce como patrón de interferencia. Cuando las ondas avanzan en el medio, continúan su propagación y retoman sus propiedades previas a la interferencia. Es por esta razón, que cuando se tienen dos rendijas, no se observa dos franjas verticales como en el caso de las canicas, sino que se observa varias franjas de distinta intensidad debido al patrón de interferencia.

La tercera prueba y más importante consiste en lanzar partículas microscópicas, electrones. Si se lanza una ráfaga de electrones a la lámina con una sola rendija, se observa que se forma una franja vertical en la pantalla detectora, tal y como se evidenció con las canicas. Ahora bien, si lanzamos de nuevo los electrones pero a través de la lámina con dos rendijas, se observa un comportamiento totalmente inesperado. Considerando los electrones como partículas, se espera que aparezcan dos franjas verticales en la pantalla como se evidenció con las canicas, pero esto no es lo que sucede.

Cuando la ráfaga de electrones incide en las dos rendijas y las atraviesa, en la pantalla se observa un patrón de interferencia tal y como sucedió con las ondas. ¿Cómo es posible que los electrones puedan dibujar un patrón de interferencia como una onda, si son partículas?

Los físicos de ese entonces pensaban que los electrones chocaban unos contra otros y que por eso se dibujaba el patrón de interferencia, así que decidieron lanzarlos uno a uno a través de las rendijas para que no pudieran afectarse entre sí. Curiosamente, a pesar de ese cambio, la sorpresa fue que aún se seguía observando el patrón de interferencia. Sin duda, este experimento desconcertó mucho a los físicos, tanto que decidieron averiguar por cuál de las dos rendijas pasaba el electrón por medio de un observador, la luz.

Para este nuevo intento, se dispone de una fuente de luz entre el dispositivo que lanza los electrones y la lámina de hierro con las dos rendijas. La luz jugará el papel de observador que nos ayudará a determinar por cuál abertura atraviesa el electrón. Una vez se lanzan los electrones, se enciende la luz y se observa que atraviesa las rendijas, lo más extraño es que cuando llegan a la pantalla detectora, dibujan dos franjas verticales y no el patrón de interferencia. Y, por otro lado, cuando nuevamente son lanzados los electrones y no se prende ninguna fuente de luz, se dibuja un patrón de interferencia en la pantalla. Pero ¿por qué cuando se enciende la luz aparecen dos franjas y cuando se apaga aparece el patrón de interferencia, será que la luz provoca un cambio en el comportamiento del electrón?

En este experimento se ponen sobre la mesa una serie de cuestiones: La primera es que solo hay un electrón en vuelo en cada impacto en la pantalla, entonces se podría suponer que ha pasado por una de las dos rendijas. La segunda es que si los electrones se han comportado como una onda, entonces estamos obligados a pensar que ha pasado por las dos rendijas a la vez. Y la tercera, es que mientras se desarrolla el experimento no podemos determinar la trayectoria que sigue un electrón en particular. Entonces ¿podemos determinar si un electrón pasa solo por una o por ambas rendijas a la vez? La mecánica cuántica nos responde a esta pregunta con un rotundo no.

Esto implica que la naturaleza se niega a decidirse entre ondas y partículas, esa es una clasificación que se ha hecho en la comunidad científica. Si forzamos el experimento para saber la trayectoria o la rendija por la que pasa un electrón se pierde el patrón de interferencia. Así que, si queremos identificar propiedades de las partículas las encontraremos, pero el precio a pagar es perder las características de onda del sistema bajo estudio (Borja, 2013).

“Pareciera que fuera imposible diseñar un aparato para determinar por cuál rendija pasa el electrón, sin que al mismo tiempo no se perturbe los electrones lo suficiente como para destruir el patrón de interferencia. Si un aparato es capaz de determinar por cuál rendija pasa el electrón, no puede ser tan delicado que no perturbe el patrón de interferencia de un modo esencial. Nadie ha encontrado una manera de evitar este principio de indeterminación. Por lo tanto, debemos suponer que este comportamiento representa una característica básica de la naturaleza” (Feynman, 1971, págs. 1-11).

Es entonces como este experimento de la doble rendija muestra que bajo el contexto de la mecánica cuántica, todo acto de observación está ligado a una alteración del objeto observado. Esto no sucede en la mecánica clásica, la observación que se efectúa sobre un objeto no altera en absoluto el comportamiento de éste. Un objeto es “grande” cuando la alteración que acompaña a nuestra observación es despreciada y “pequeño” cuando no pueda serlo.

Como consecuencia de lo anterior, (Dirac, 1958, pág. 17) plantea que “hemos de suponer que existe un límite de la precisión de nuestro poder de observación y de la magnitud de la alteración que le acompaña, límite que es inherente a la naturaleza de las cosas y que es imposible superar aunque se perfeccionen las técnicas o se aumente la habilidad práctica del observador”. Pareciera que el comportamiento a escala atómica, lo “pequeño”, forma parte de su naturaleza misma, es esencial y permanente.

En ese sentido, se deduce que si el objeto es suficientemente “grande” como para que su alteración se pueda despreciar, se puede recurrir a la mecánica clásica para dar una explicación. Si por el contrario, el objeto es “pequeño”, será necesario hacer uso de una nueva teoría que dé cuenta de su comportamiento, la mecánica cuántica (Dirac, 1958).

2.2 La importancia de la actividad experimental para la enseñanza de la mecánica cuántica

En la enseñanza de la física moderna y en particular de la mecánica cuántica, suele considerarse que los conceptos están demasiado alejados de las percepciones de los estudiantes. En ocasiones estos conceptos modernos desafían ciertas nociones de la realidad que hemos creado a partir de las observaciones cotidianas que tenemos del mundo. Sin embargo, existen razones para pensar que el comportamiento del mundo atómico y subatómico tiene diferentes maneras de conocer, siendo este, un hecho que por sí solo justifica incluirlo en la enseñanza (Fanaro, Arlego, & Otero, 2007).

El advenimiento de la mecánica cuántica constituye un hito en la evolución intelectual de la especie humana, y en consecuencia, la academia es un ámbito apropiado para invitar a que los estudiantes la conozcan. El conocimiento básico de dicha revolución debería integrar el bagaje cultural de una población educada y desarrollada, al igual que la literatura, la matemática o la

economía política (Fanaro, Arlego, & Otero, 2007). La mecánica cuántica incide en diversos campos de la actividad cognitiva y obliga a reformular explicaciones y conceptos muy arraigados en nuestra experiencia cotidiana. La conceptualización o formalización de un sistema cuántico requiere ingresar en un nuevo dominio explicativo y aceptar que existe una nueva cosmovisión de la naturaleza que desafía a la actual que hemos construido con la experiencia sensible.

Adicional a esto y considerando las dificultades y la forma como se plantea la enseñanza de la mecánica cuántica y, así mismo, dada la importancia que tiene esta en la visión del mundo, surge la necesidad de plantear una propuesta de enseñanza que permita una mejor comprensión de los diferentes conceptos que se abordan en mecánica cuántica (Rozo, Walteros, & Cortés, 2019). En razón con esto, se proponen actividades experimentales que permitan a los estudiantes reflexionar en torno al fenómeno mismo y a la vez les proporcione un conocimiento moderno y significativo.

(Rozo, Walteros, & Cortés, 2019, pág. 197), mencionan que la actividad experimental es de gran importancia para la enseñanza de la mecánica cuántica ya que es entendida como “la estrategia que le permite al estudiante desarrollar habilidades y maneras de proceder para el análisis del fenómeno, permitiéndole construir y reconstruir argumentos para dar cuenta de este. En este sentido, se espera que el estudiante logre desarrollar una explicación en torno al fenómeno, ya que, en general, se presentan dificultades alrededor de los conceptos debido a que los fenómenos cuánticos no son directamente evidentes y, en muchas ocasiones, son contrarios a la intuición de los estudiantes”. Evidentemente la actividad experimental bajo este contexto, logra ser un puente que le permite al estudiante exteriorizar y hablar de lo que aprende a partir de los efectos que observa.

Bajo este contexto, (Malagón, Sandoval, & Ayala, 2013) mencionan tres puntos importantes para contextualizar la perspectiva fenomenológica del trabajo de investigación. El primer punto tiene que ver con el carácter exhibido y constructivo del fenómeno, esto quiere decir que las explicaciones, descripciones e interpretaciones que demandan la comprensión de una fenomenología, requieren la organización de las experiencias y observaciones con el propósito de construir una descripción detallada del fenómeno.

El segundo punto se relaciona con las explicaciones que construye el sujeto de un fenómeno. Estas explicaciones deben estar sólo en términos de lo que se percibe, no deberían justificarse en elementos metafísicos o cualidades ocultas más allá de lo que se está observando. El tercer punto hace referencia a que el fenómeno tendrá diferentes interpretaciones o modos de ver según la conciencia y experiencia del observador. Esto implica que a partir de las diferentes organizaciones y explicaciones que se construyan del fenómeno, se llega a un consenso el cual nos permite conceptualizar la fenomenología.

Ahora bien, en relación con los anteriores puntos y retomando la propuesta de las actividades experimentales, es preciso responder a preguntas cómo: ¿Qué busca la actividad experimental desde la perspectiva fenomenológica? y ¿Cómo la actividad experimental contribuye a la formalización de fenómenos?

Para dar respuesta a estos interrogantes, se pretende abordar los planteamientos hechos por los autores (Malagón, Sandoval, & Ayala, 2013, pág. 125) en su artículo *La Actividad Experimental: Construcción De Fenomenologías Y Procesos De Formalización*. Los autores afirman que “la actividad experimental busca la construcción y comprensión de fenomenologías, la ampliación de la experiencia, la construcción de formas de hablar del fenómeno y la concreción de supuestos conceptuales”. Cuando se hace referencia a la construcción y comprensión de fenomenologías, quiere decir que la actividad experimental busca construir un conjunto de explicaciones y distintos modos de hablar de los fenómenos. En este punto, se quiere explicitar que la experiencia sensible que tienen los sujetos del fenómeno crea vínculos que les permiten comprender las fenomenologías de una forma más intuitiva.

La actividad experimental desde esta perspectiva busca la ampliación de la experiencia, es decir, juega el papel de campo de efectos, relaciones y lenguajes en el sentido de que puede brindarle al sujeto experiencia sensible en torno a los fenómenos que desconoce. Por otra parte, en la construcción de formas de hablar del fenómeno, “un aspecto importante del proceso de formalización de un fenómeno o fenomenología, es que a su vez que el ámbito de la experiencia se transforma, también se transforma el ámbito del lenguaje con el que es posible referirse a esa experiencia” (Malagón, Sandoval, & Ayala, 2013, pág. 125). Es importante poner de manifiesto

que estos procesos también son maneras de formalizar un fenómeno, no solamente haciendo uso de relaciones y expresiones matemáticas para hablar de este.

Por último, la actividad experimental busca la concreción de supuestos conceptuales. Aquí se pretende examinar diversas rutas de ampliación de la base fenomenológica o de hechos de observación con los que se destacan los rasgos relevantes del fenómeno. Las actividades buscan que los sujetos elaboren criterios, opiniones, explicaciones, argumentos y conceptos en torno a los efectos observados.

Es importante señalar que las actividades experimentales tienen una profunda relación con la caracterización de cualidades en los procesos de formalización. Cuando se empieza a organizar el fenómeno se comienza a identificar cualidades o características que permiten hablar de este, lo cual conduce a una formalización que incluye entre otras cosas, clasificaciones, relaciones de orden, mediciones de diversos tipos entre otras (Malagón, Sandoval, & Ayala, 2013).

Bajo ese contexto, como parte del proceso de investigación, se construye la siguiente reflexión: Recordemos que tres aspectos característicos de la experiencia son: uno, si bien el sujeto la conforma en su interacción con su entorno físico y cultural, esta hace parte de él y lo define; dos, la experiencia constituye un todo organizado; y, tres, la experiencia es la base de la constitución del mundo exterior por parte del sujeto. Ese vínculo entre la perspectiva fenomenológica y las actividades experimentales permite dinamizar la teorización de una experiencia sensorial, dado que no existen esquemas teóricos o conceptuales que no tengan un vínculo con la experiencia. En ese sentido, el estudiante amplía el campo de la experiencia y logra construir significados y explicaciones de la fenomenología que, a su vez, permiten interiorizar y formar una base conceptual de los efectos observados en las actividades experimentales.

La visión del trabajo de investigación pretende mostrar a los estudiantes que la mecánica cuántica tiene diferentes maneras de conocer y otras explicaciones de la realidad física que desafían nuestra intuición pero que vale la pena adentrarse en este nuevo mundo físico. Las actividades experimentales son pertinentes porque buscan que los estudiantes construyan una nueva base conceptual y un pensamiento desligado de las ideas clásicas, un pensamiento cuántico y moderno.

Capítulo III

Sobre el entrelazamiento cuántico

“El descubrimiento del cuanto de acción no sólo nos muestra la limitación natural de la física clásica, sino que, al arrojar nueva luz sobre el antiguo problema filosófico de la existencia objetiva de los fenómenos independientemente de nuestras observaciones, nos enfrenta con una situación desconocida hasta ahora en la ciencia natural.”.

Niels Bohr

3.1 El problema de la medición en la mecánica cuántica

La física clásica aspiraba a construir una imagen objetiva, completa y realista sobre cómo funciona el mundo. Sin embargo, con la mecánica cuántica esta aspiración de pronto se sintió simplista y presuntuosa. Esto debido a una característica fundamental de la mecánica cuántica, íntimamente relacionada con lo que hoy se conoce como el problema de la medición (Okon, 2014).

El problema de la medida cuántica es una cuestión que afecta a los límites y la universalidad de esta. Antes de que un observador realice una medición, las funciones de onda de la partícula evolucionan según la ecuación de Schrodinger. Pero luego, cuando el observador se dispone con diversos aparatos para realizar la medida, las reglas del juego cambian repentinamente. La ecuación de Schrodinger se deja de lado y domina el colapso de la ecuación de onda de probabilidad.

A decir verdad, la probabilidad introducida por la mecánica cuántica es de un carácter diferente y más fundamental. Independientemente de mejorar en la recolección y análisis de grandes bases de datos o en la potencia de los futuros ordenadores cuánticos, lo más que se puede hacer, según la mecánica cuántica, es predecir la probabilidad de que un electrón, protón, neutrón, o cualquier otro de los constituyentes de la naturaleza sea encontrado aquí o allá. Sin duda, la probabilidad reina en el microcosmos (Greene, 2004).

Einstein, en particular, estaba profundamente molesto por el carácter probabilista de la teoría cuántica. La física, decía una y otra vez, se dedica a determinar con certeza qué ha sucedido, qué está sucediendo y qué sucederá en el entorno a nuestro alrededor. A pesar de eso, Einstein no podía negar que la mecánica cuántica era muy acertada para explicar y predecir las observaciones experimentales del micromundo aunque fuera desde un marco estadístico. Einstein dedico mucho

esfuerzo y tiempo de su vida a tratar de mostrar que la mecánica cuántica no era la última palabra sobre cómo funciona el universo. Incluso si no podía saber cuál era, Einstein trataba de convencer a todos de que había una descripción más profunda y menos extraña del universo aún por encontrar y que se debía seguir trabajando en ella.

Por otro lado, Bohr y la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica (la contraparte de Einstein), afirmaban que antes de que se mida la posición de una partícula ni siquiera tiene sentido preguntar dónde estaba. Sencillamente no tiene una posición definida. La partícula tiene una posición definida, en el sentido intuitivo habitual, solo en el momento en que se observa, en el momento en que se mide su posición y se identifica su localización con certeza. Pero antes y después de que se realiza la medición, todo lo que se tiene son posiciones potenciales descritas por una onda de probabilidad que, como cualquier onda, está sujeta a efectos de interferencia. No es que la partícula tenga una posición y nosotros no la conozcamos antes de hacer la medida. Por el contrario, la partícula no tiene una posición definida antes de que se realice una medición.

Ahora bien, “pese a todo, puesto que no hay diferencia entre los átomos, protones y electrones que constituyen el observador y el aparato que utiliza, y los átomos, protones y electrones que estudia, ¿por qué hay diferencias en cómo los trata la mecánica cuántica? Si la mecánica cuántica es una teoría universal que se aplica a todo sin limitaciones, lo observado y el observador deberían ser tratados de la misma manera” (Greene, 2004, pág. 53).

Bohr en respuesta a esta pregunta afirmaba que los observadores y sus equipos son diferentes de las partículas elementales. Incluso si están hechos de las mismas partículas, ellos son conjuntos “grandes” de partículas elementales y por ello están gobernados por las leyes de la física clásica. Según el físico, en alguna parte del mundo microscópico de los átomos y partículas subatómicas y el mundo gigante de los humanos y sus aparatos, las reglas cambian porque los tamaños cambian (Greene, 2004).

La afirmación de Bohr en relación con esta división es clara, una partícula, según la mecánica cuántica, puede estar localizada en una mezcla borrosa de aquí y allá, pero nosotros no observamos este comportamiento en el mundo “grande y cotidiano”. En ese sentido, ¿cómo se conectan los dos conjuntos de reglas cuando el gran mundo de lo cotidiano se confronta con el mundo atómico, como en el caso de una medición? Bohr afirmaba contundentemente que este tipo

de preguntas no se plantean porque para él estaban más allá de los límites de nuestro intelecto, de los límites de lo que él o cualquiera podría responder.

Lo sorprendente del caso es que esta imposibilidad no se relaciona con la aptitud del hombre para realizar mediciones, sino que sería una indeterminación inherente a la propia realidad física. Sin duda alguna, la mecánica cuántica es una realidad radicalmente extraña, está en desafío con nuestra intuición. Desde esta perspectiva, cuando medimos la posición de una partícula no estamos midiendo una característica objetiva y preexistente de la naturaleza física. Más bien el acto de medir está profundamente implicado en crear la realidad que se está midiendo.

Para Bohr, la física trata solo de cosas que podemos medir. Tratar de utilizar la física para examinar una realidad “más profunda”, una realidad más allá de lo que podemos conocer a través de medidas, es como “pedir a la física que analice el sonido de una sola mano aplaudiendo” (Greene, 2004, pág. 136). Pero en 1935, Einstein, Podolsky y Rosen, plantearon una problemática de una forma tan firme e inteligente que lo que había empezado como un aplauso de una sola mano, se ha preservado durante más de siete décadas para convertirse en un aplauso retumbante que anunciaba un salto a nuestra comprensión de la realidad mucho mayor de lo que Einstein nunca habría imaginado. Esta problemática será ahondada con más detalles en las siguientes secciones.

3.2 Entrelazamiento

En 1935 Einstein publicó junto a sus colegas Boris Podolsky y Nathan Rosen, un experimento mental que hoy conocemos como la “paradoja EPR”. Existe la posibilidad de que dos partículas compartan sus propiedades como si fueran gemelas. Pero si, como defendía la corriente mayoritaria de la mecánica cuántica, la acción de un observador sobre una de ellas debía influir en la otra, esto implicaría que existía una comunicación instantánea entre ambas. Lo cual, argumentaban Einstein y sus colaboradores, rompía el irrompible límite de la velocidad de la luz. Estas influencias fantasmales a distancia como Einstein las denominó, son el fenómeno de entrelazamiento cuántico. En esta sección se pretende mostrar mediante una ejemplificación en qué consiste este fenómeno haciendo uso de una fuente de fotones entrelazados, cristales de calcita y detectores.

Algunos estados excitados de un átomo son tales que éste vuelve a su estado fundamental mediante dos saltos cuánticos en rápida sucesión (figura 3.1). Las partículas entrelazadas, como

en este caso, surgen cuando un electrón que desciende dos niveles energéticos dentro del átomo genera dos fotones en direcciones opuestas. Puesto que ninguna dirección en el espacio tiene preferencia, la polarización observada de los fotones será completamente aleatoria (Rosenblum & Kuttner, 2016). Los dos fotones que son liberados viajan en direcciones opuestas y siempre exhiben la misma polarización. Si, por ejemplo el fotón que sale por la derecha tiene un estado de polarización vertical $|V\rangle$, su compañero también estará polarizado verticalmente.



Figura 3.1 Representación del entrelazamiento de dos fotones

Es importante poner de manifiesto que si dos fotones llegan a polarizadores equidistantes justo al mismo tiempo, tienen que haber sido emitidos por el mismo átomo y, por lo tanto, están entrelazados. Pensemos en la siguiente analogía: Se considera que Alice y Bob son dos jóvenes que pretenden observar el comportamiento de los fotones. Entre Alice, a la izquierda y, Bob a la derecha hay una fuente de fotones en estados entrelazados (Figura 3.2). Cada uno de ellos observa la polarización de los fotones entrelazados con el eje de sus polarizadores orientados en el mismo ángulo. Los detectores de fotones están situados en las trayectorias 1 y 2 y serán los encargados de registrar la llegada de un fotón polarizado paralelo o perpendicular al eje de su cristal de calcita (Rosenblum & Kuttner, 2016).

Cada vez que Alice observa que **D1** ha registrado un fotón, Bob siempre observa que su compañero sigue la trayectoria 1 (de forma horizontal hasta el otro detector D1) y cada vez que Alice observa que **D2** ha registrado un fotón, Bob observa que su compañero sigue la trayectoria 2 (de forma vertical hasta el otro detector D2). Puesto que los fotones están entrelazados ¿por qué parece extraño que tengan la misma polarización? ¿será que la polarización de los fotones fue creada de esa manera?

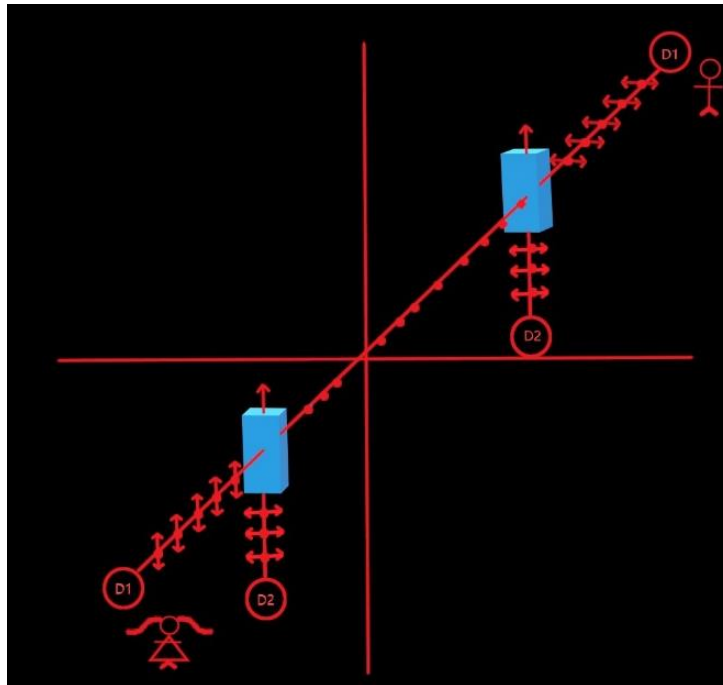


Figura 3.2. Representación de Alice y Bob con fotones en estados de polarización entrelazados.

Desde el contexto cuántico no se puede conocer el valor de una variable antes de ser observada. Cuando se realiza una medición se perturba el sistema cuántico de tal manera que lo hace colapsar a un estado particular. De acuerdo con lo anterior, la polarización del fotón de Alice no existía como realidad física antes de su observación. Lo mismo para el fotón de Bob, por eso no se dispusieron flechas de polarización a los fotones entrelazados en el camino hacia las calcitas de Alice y Bob.

Ahora bien, aquí hay una cuestión importante para resaltar: Supongamos que Alice está un poco más cerca de la fuente de fotones que Bob, esto quiere decir que su fotón será detectado antes. El que siga una u otra trayectoria es completamente aleatorio, pero si el fotón de Alice es registrado por su detector **D1**, su compañero siempre tendrá la misma polarización al ser registrado por el detector **D1** de Bob, aunque el fotón de Bob no haya recibido ningún tipo de información del comportamiento de su compañero en el polarizador de Alice.

La detección previa del fotón de Alice que sigue una u otra trayectoria aleatoria no pudo afectar *físicamente* al fotón de Bob, simplemente este estaba alejándose de Alice a la velocidad de la luz. Alice y Bob podrían estar incluso a millones de años luz de distancia y observar los fotones

entrelazados al mismo tiempo ¿Entonces como adquirieron ambos fotones la misma polarización tras la observación de la polarización de uno de ellos?

Los fotones entrelazados no tienen una dirección de polarización definida hasta que se observa la polarización de uno de ellos. Estos fotones parecen estar en un estado de polarización idéntica pero no tienen una polarización particular. Es la observación la que define que la polarización de uno de los fotones sea horizontal, por ejemplo, lo que instantáneamente colapsa ambos fotones en la polarización horizontal sin importar la distancia que los separe, como lo sugiere (Rosenblum & Kuttner, 2016).

“No es el hecho de que los fotones en estados entrelazados muestren polarizaciones idénticas lo que es desconcertante. Podríamos pensar que simplemente fueron creados así. Lo desconcertante es la explicación de la mecánica cuántica de este hecho: que los fotones no fueron creados con una polarización idéntica particular, ya que ninguna propiedad tiene realidad física hasta que se observa” (Rosenblum & Kuttner, 2016, pág. 163).

Sin duda alguna, el entrelazamiento cuántico ha sido el fenómeno más intrigante de la mecánica cuántica. Es importante poner de manifiesto que la condición para que se dé un estado entrelazado, es que tiene que haber simultaneidad al momento de salir los fotones de la fuente, de lo contrario, no se garantiza que los fotones sean idénticos.

Bajo ese contexto, dos partículas subatómicas están en estado de entrelazamiento sin considerar la distancia que las separe, ni medios existentes de comunicación, pero su comportamiento es el mismo como si estuvieran “conectadas” al mismo tiempo. De esta forma, cuando una de las partículas colapsa hacia un estado cuántico, la otra partícula colapsará hacia el mismo estado.

En ese sentido, “la mecánica cuántica es un conjunto de reglas que fueron desarrolladas para describir el comportamiento de objetos microscópicos que, como decía Heisenberg, funciona, es decir describe adecuadamente la realidad. Desde sus comienzos y hasta hoy en día la interpretación de estas reglas es tema de discusión. Recordemos la interpretación de Copenhague, cuando nos dice que un sistema cuántico evoluciona en una superposición de estados y cuando es medido por un objeto clásico colapsa a uno de los estados permitidos por el objeto clásico” (Schmiegelow, 2006, pág. 6)

3.3 El debate Einstein-Bohr y la paradoja EPR

Einstein y Bohr se encontraron por vez primera durante una visita a Berlín en junio de 1920. La relación entre ellos fue estrecha y de gran afecto y aprecio mutuo. Sin proponérselo, entablaron una polémica sobre la mecánica cuántica que se prolongó hasta la muerte de Einstein en 1955 (De La Peña, 2000).

A pesar de que Einstein había establecido algunos de los fundamentos físicos que más adelante construirían la mecánica cuántica (como el concepto de fotón), esta teoría nunca le simpatizó. Para él, debía existir una realidad objetiva que la mecánica cuántica no podía describir por limitaciones de la propia teoría, y no por la naturaleza del universo.

A su vez Bohr, el principal artífice de la interpretación de Copenhague, se levanta en su defensa afirmando que los objetos del dominio microscópico carecen de realidad objetiva hasta que se observen. Bohr pensaba que el mundo microscópico tenía una nueva forma de ser, que no tenía la misma naturaleza física que el mundo cotidiano en el que vivimos y por lo tanto, no había forma de evitar esas limitaciones. Bohr era sensato y estaba convencido de que la mecánica cuántica era una teoría exitosa a pesar de sus resultados mediante probabilidades.

En Solvay, 1927 y 1930, Einstein intentó eludir el principio de incertidumbre para demostrar que la mecánica cuántica era inconsistente y, por lo tanto, incompleta. Bohr, ayudado por Heisenberg y Pauli, había desmantelado con éxito cada experimento mental y defendió la interpretación de Copenhague. Posteriormente, Einstein aceptó que, aunque la mecánica cuántica era lógicamente consistente, no era la teoría definitiva que afirmaba Bohr. Einstein sabía que necesitaba una nueva estrategia para demostrar que la mecánica cuántica estaba incompleta, que no captura completamente la realidad física. Con este fin, desarrolló un muy importante experimento mental (Kumar, 2008).

En efecto, siempre hubo jóvenes físicos ansiosos por trabajar con Einstein. Uno era Nathan Rosen, un neoyorquino de 25 años que llegó del MIT en 1934 para servir como su asistente. Unos meses antes de Rosen, Boris Podolsky, de 39 años y nacido en Rusia, se había unido al instituto. Conoció a Einstein por primera vez en Caltech en 1931 y habían colaborado en un artículo. Einstein tuvo una idea para otro artículo. Este marcaría una nueva fase en su debate con Bohr, ya que desataría un nuevo asalto a la interpretación de Copenhague.

Durante varias semanas a principios de 1935, Einstein se reunió con Podolsky y Rosen en su oficina para poner en evidencia su idea. A Podolsky se le asignó la tarea de escribir el trabajo resultante, mientras que Rosen hizo la mayoría de los cálculos matemáticos necesarios. Einstein, como Rosen contribuyeron con el punto de vista general y sus implicaciones. Con solo cuatro páginas, el documento de Einstein-Podolsky-Rosen, o el documento de EPR, como se dio a conocer, se completó y se envió por correo a fines de marzo de ese año. “Can quantum Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?”, se publicó el 15 de mayo en la revista estadounidense Physical Review.

Einstein quería refutar la afirmación de Bohr de que la mecánica cuántica era una teoría completa y fundamental de la naturaleza al demostrar que existían "elementos de la realidad" objetivos que la teoría no captaba. Einstein había cambiado el foco del debate con Bohr y sus partidarios, al pasar de la consistencia interna de la mecánica cuántica a la naturaleza de la realidad y el papel de la teoría.

En el artículo original de EPR se muestra un complejo experimento con la posición y momento de las partículas. En este caso, se examinará la versión más simple y moderna en términos de polarización fotónica. Aunque la descripción de la mecanocuántica de las polarizaciones de los fotones entrelazados no incluye una dirección de polarización particular como propiedad físicamente real, la mecánica cuántica afirmaba ser una teoría completa de los fenómenos a escala microscópica (Rosenblum & Kuttner, 2016).

Para poner en cuestión esta pretensión de completitud, Einstein y sus colaboradores tenían que aclarar qué se comprende por realidad física. Definir la realidad ha sido un problema que muchos filósofos han abordado desde la época de Platón. EPR no tenía por qué describir la realidad en general, sino solo determinar una condición suficiente para que algo tenga realidad física. Si esa realidad física no es capaz de ser descrita por la teoría, entonces es una teoría incompleta. He aquí la condición ofrecida por EPR:

“If, without in any way disturbing a system, we can predict with certainty (i.e., with probability equal to unity) the value of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity” (Einstein, Podolsky, & Rosen, 1935, pág. 777).

Esto último hace referencia a que “si una propiedad física del objeto puede conocerse sin observarse, entonces esa propiedad no pudo haber sido creada por su observación. Y si dicha propiedad conocida no ha sido creada por su observación, debe haber existido como realidad física antes de su observación” (Rosenblum & Kuttner, 2016, pág. 164).

En ese sentido, EPR afirmaba que para que una teoría fuera completa tenía que haber una correspondencia uno a uno entre un elemento de la teoría y un elemento de la realidad. Una condición suficiente para la realidad de una cantidad física, como el impulso, por ejemplo, es la posibilidad de predecirlo con certeza sin perturbar el sistema. Si existía un elemento de la realidad física que la teoría no tenía en cuenta, entonces la teoría estaba incompleta. La situación sería similar a la de una persona que encuentra un libro en una biblioteca y cuando trata de verificarlo, el bibliotecario le dice que, según el catálogo, no hay registros de que la biblioteca tenga el libro. Con el libro en sus manos y observando los sellos que indican que efectivamente era parte de la colección, la única explicación posible a esta situación sería que el catálogo de la biblioteca estaba incompleto.

Ahora bien, si EPR lograba encontrar una propiedad física real antes de ser observada, entonces podrían celebrar que habían demostrado la no completitud de la mecánica cuántica. Esa propiedad que estarían buscando es la polarización particular de uno de los miembros de un par de fotones entrelazados.

Retomemos la ejemplificación de Alice y Bob con sus cristales de calcita y sus detectores de fotones. Esta vez Alice está un poco más cerca de la fuente de fotones entrelazados que Bob, por lo que recibe su fotón antes de que Bob reciba el fotón compañero. Ahora supongamos que Alice observa un fotón polarizado perpendicular a su eje, que es registrado por su detector **D1**. Alice de inmediato sabe que el fotón compañero que va hacia Bob tiene polarización perpendicular, de manera que, cuando alcance el detector **D1** de Bob, este seguirá la dirección **V**.

Lo desconcertante es que Alice no pudo haber perturbado el fotón de Bob. Este salió de la fuente de fotones y se alejó a la velocidad de la luz, puesto que nada puede ir más rápido que la velocidad de la luz, nada que Alice pueda enviar tras el fotón de Bob puede atraparlo. Cuando Alice observo su fotón, el de Bob aún no había llegado a él, por lo que Bob tampoco podría haberlo perturbado (Rosenblum & Kuttner, 2016).

Ahora bien, ni Alice ni Bob ni nadie han observado la polarización del fotón de Bob. Pero dicha polarización inobservada puede conocerse con certeza. Entonces podemos decir que por el momento, ¡EPR cumplió su cometido! El hecho de que Alice conozca con certeza la polarización del fotón de Bob “sin haberlo perturbado de ninguna manera” cumple el criterio de EPR para que la polarización del fotón de Bob sea una realidad física. Esto quiere decir que la mecánica cuántica, no está incluyendo esta realidad física y, por lo tanto, la conclusión del argumento EPR es que la teoría cuántica es incompleta.

Cuando Bohr leyó el artículo de EPR, casi una década después de que se promulgara la interpretación de Copenhague, todavía no era plenamente consciente de las implicaciones de la teoría cuántica, en particular la que objetaba Einstein y sus colaboradores: que la observación no puede afectar instantáneamente a un sistema físico remoto.

Bohr trabajó sin descanso durante varias semanas para darle respuesta a EPR, construyo un nuevo artículo con el mismo nombre en donde defendería nuevamente la teoría. Bohr no cuestiona la lógica del argumento EPR, lo que rechaza es su punto de partida, la condición para que algo sea una realidad física debido a que asumen la misma separabilidad que se observa en la física clásica. Esto es, si dos partículas no se ejercen ninguna fuerza física, lo que le ocurre a uno no puede de ninguna manera perturbar al otro. En la ejemplificación de fotones entrelazados, la observación que realiza Alice de su fotón no puede ejercer ninguna fuerza física sobre el fotón de Bob y, por lo tanto, según EPR, Alice no puede afectarlo.

Bohr estaba de acuerdo con que Alice no puede afectar de ninguna forma el fotón de Bob. Pero sostenía que, incluso sin una perturbación física, la observación de Alice ejerce una influencia *instantánea* sobre el fotón de Bob. Y según Bohr, esto constituye una perturbación que incumple con la condición de realidad de EPR (Rosenblum & Kuttner, 2016). Por ejemplo, solo después de que Alice observará que su fotón tenía una polarización horizontal, el fotón de Bob también adquiriría una polarización horizontal.

¿Qué le hacía la observación de Alice al fotón de Bob entonces? No se debería decir que su observación “afecto” al fotón de Bob porque no hay involucrada ninguna fuerza física, así que resulta más conveniente usar el termino usado por Bohr: Alice “inflúa en” el comportamiento del fotón de Bob (Rosenblum & Kuttner, 2016).

Es importante poner de manifiesto que Alice no podía transmitir ningún tipo de información a Bob mediante sus observaciones. Lo único que hacía Bob era observar una serie de fotones polarizados aleatoriamente que llegaban a sus detectores. Solo cuando Alice habla con Bob y comparan resultados, comprueban la asombrosa y fantasmal correlación entre la polarización de sus fotones. Siempre que ella veía un fotón en estado de polarización vertical, él veía un fotón con polarización vertical, y siempre que ella veía un fotón en estado de polarización horizontal, él veía un fotón con polarización horizontal. Bohr y Einstein siempre estuvieron de acuerdo con los resultados del experimento de EPR, la discusión giraba en torno a la interpretación que tenía cada uno de esos resultados.

Bohr en su intento por seguir defendiendo la mecánica cuántica, argumenta de manera muy filosófica que a pesar de que esta correlación es inexplicable, la meta de la física y de la ciencia en general, no debería ser describir la naturaleza, sino solo describir lo que podemos decir de la naturaleza. Sin embargo, Einstein rechazó su respuesta.

Einstein insistía en que el mundo que nos rodea es completamente real y la ciencia debía intentar explicarlo. Aludiendo a este caso, afirmaba que si un fotón mostraba una polarización particular, no se debía al acto de observación, sino a que el fotón ya poseía una propiedad física que determinaba esa polarización. Y si esa propiedad no se encontraba contemplada en la teoría, entonces la mecánica cuántica era una teoría incompleta. Se burlaba de las “influencias” de Bohr llamándolas “acciones fantasmales”. En definitiva no podía aceptar que ese tipo de sucesos formaran parte del funcionamiento del universo (Rosenblum & Kuttner, 2016).

Einstein pensaba firmemente que los físicos rechazarían la refutación de Bohr pero no fue así. La teoría cuántica funcionaba bien y se pensaba como una base firme para un rápido avance de la física y sus aplicaciones prácticas, un ejemplo de esto es la actual computación cuántica.

Los experimentos realizados desde entonces han demostrado que la “acción fantasmal a distancia” existe realmente, con lo que el argumento de Einstein, una vez más, no puede derrotar a la mecánica cuántica. Aunque aún hay diferencias en la interpretación de la teoría, la opinión prevalente es que, efectivamente, la realidad no es local ni absoluta. Por supuesto, es posible que teorías del futuro expliquen por qué es de esa forma y que, al final, Einstein tenga razón y haya factores que aún no se están teniendo en cuenta, pero por ahora todo apunta a que Bohr tenía la

razón. Su enfoque hacia la interpretación de la mecánica cuántica no es ontológico sino puramente epistemológico.

En adición con lo anterior, a partir de los elementos que se recogen de esta discusión se construye la siguiente postura: La mecánica cuántica, en efecto, es todo un catálogo probabilístico de disposiciones y sin duda una de las teorías científicas más exitosas de la humanidad. En el marco de este debate, se está de acuerdo con Bohr cuando menciona que la ciencia debe limitarse a describir sólo lo que observa. La mecánica cuántica, y con más generalidad la física, sólo está obligada a explicar características del mundo que pueden medirse.

Einstein, Podolsky y Rosen se proponían demostrar que la mecánica cuántica proporciona una descripción incompleta del universo. Pero, medio siglo más tarde, ideas teóricas y resultados experimentales inspirados por su trabajo nos obligan a volver su análisis al revés y concluir que la parte más básica, intuitivamente razonable y clásicamente sensible de su rozamiento es errónea. Contrario a lo que pensaban, la mecánica cuántica es una teoría no-local.

El resultado de lo que se hace en un lugar puede estar ligado a lo que sucede en otro lugar, incluso si nada viaja entre los dos lugares, incluso si no hay tiempo suficiente para que nada pueda completar el viaje entre los dos lugares. La sugerencia intuitivamente satisfactoria de EPR de que tales correlaciones de largo alcance aparecen meramente porque las partículas tienen propiedades definidas, preexistentes y correlacionadas queda descartada por los datos. Esto es lo que hace este fenómeno tan extraordinario y lo que nos impulsa a “estar del lado” de Bohr y la mecánica cuántica. Por lo pronto, queda seguir construyendo nueva física que permita en un futuro próximo, resolver uno de los más grandes misterios de la naturaleza física del mundo microscópico, el entrelazamiento.

3.3 Localidad desde la perspectiva relativista y su relación con EPR

El argumento central de EPR fue la suposición de localidad de Einstein: no existe acción misteriosa e instantánea a distancia. La localidad descartó la posibilidad de un evento en una determinada región del espacio instantáneamente, más rápido que la luz, influyendo en otro evento en otro lugar. Para Einstein, la velocidad de la luz era el límite de la naturaleza sobre la rapidez con que algo podía viajar de un lugar a otro. Para Einstein era inconcebible que una medición de

una variable de la partícula A afectara instantáneamente a otra partícula B ubicada fuera del cono de luz de la partícula A.

Para comprender a qué se refiere Einstein con el principio localidad es preciso hacer uso de los conos de luz. Los conos de luz son representaciones geométricas en el espacio-tiempo para describir la evolución de los eventos.

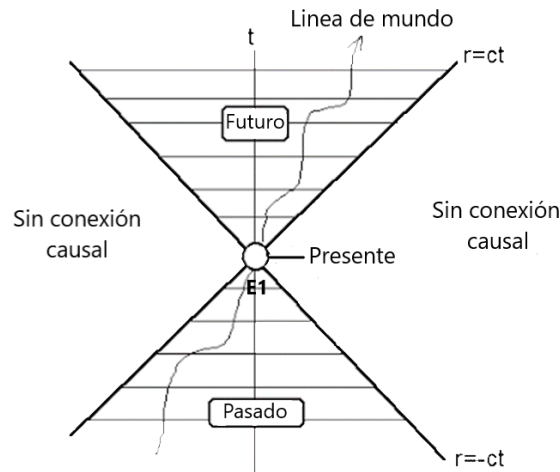


Figura 3.3 Representación de los conos de luz en la geometría de Minkowski.

Hermann Minkowski, profesor de Einstein, fue el encargado de construir estas estructuras fundamentales de la relatividad especial como se muestra en la figura 3.3. La Figura muestra un evento E1 y las líneas de mundo de dos pulsos de luz que pasan por E1, uno viaja hacia la izquierda y el otro hacia la derecha. La trayectoria del pulso que va hacia la derecha tiene pendiente 1, y la trayectoria del pulso que va hacia la izquierda tiene pendiente -1 (De La Torre, 2006).

Las dos rectas que pasan por E1 cortan el espacio-tiempo en cuatro partes: izquierda, derecha, pasado y futuro. Las partes izquierda y derecha están fuera del cono de la luz del observador en E1 y, por lo tanto, no los puede afectar ni puede ser afectado. El cono de luz futuro son todos los eventos posibles que pueden ser afectados por E1, en tanto, el cono de luz pasado englobaría todas las "causas" posibles que afectarían al evento en E1. En otras palabras, todo aquello que percibimos está contenido en E1, mientras que todo aquello sobre lo que podríamos influir se encuentra contenido en el cono de luz futuro.

El intervalo Δs^2 entre dos eventos en el espacio-tiempo está dado por:

$$\Delta s^2 = c^2(\Delta t)^2 - (\Delta r)^2,$$

siendo una magnitud invariante,

$$\Delta s'^2 = \Delta s^2.$$

La anterior ecuación nos da cuenta de que la separación o intervalo espaciotemporal no cambian con los marcos de referencia. En la geometría euclidiana la definición de distancia involucra la parte espacial ya que el tiempo se considera universal. En el espacio-tiempo el invariante Δs^2 puede ser positivo, negativo o cero. Cuando el intervalo Δs^2 es positivo, los eventos están conectados por un intervalo como de tiempo. Cuando el intervalo Δs^2 es cero, los eventos están conectados por un intervalo como de luz y cuando el intervalo Δs^2 es negativo, los eventos están conectados por un intervalo como de espacio.

- **Intervalo como de tiempo:** Para que Δs^2 sea positivo debe cumplirse que: $\Delta s^2 = c^2(\Delta t)^2 - (\Delta r)^2 > 0$.

Los conos en particular nos sirven para representar los límites de la influencia causal. La historia de una partícula en el espacio-tiempo se representa por una línea que está vinculada por un intervalo como de tiempo (figura 3.4). Esta es simplemente otra forma de decir que una partícula material no puede viajar más rápido que la luz. Ninguna señal puede viajar desde el interior al exterior del cono de luz futuro y, por eso, el cono de luz representa los límites de la causalidad (Penrose, 1999).

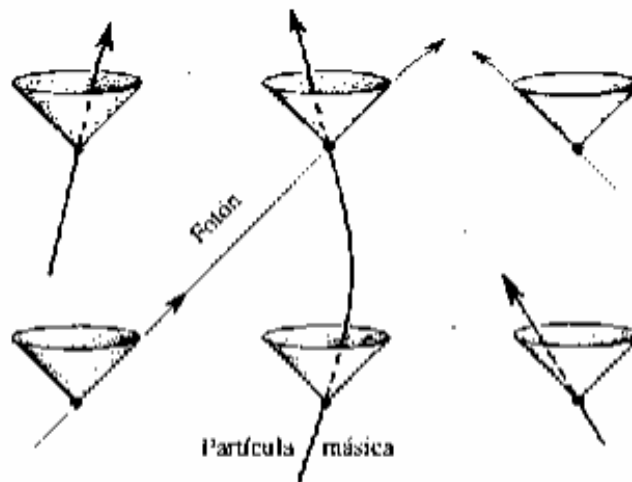


Figura 3.4. Representación del movimiento de una partícula en el espacio-tiempo de Minkowski. Las partículas solo pueden viajar en el interior de sus conos de luz futuros (Penrose, 1999, pág. 17).

Como esta señal está dentro del cono de la luz de E1, es claro que también E2 tiene que estar dentro del cono de la luz de E1. En conclusión, lo que ocurre dentro del cono de la luz de E1 puede tener una conexión causal con lo que ocurre en E1. Lo que ocurre en la región del futuro puede ser efecto de lo que ocurre en E1. Lo que ocurre en la región del pasado puede ser causa de lo que ocurre en E1. Lo que ocurre en la región del futuro puede ser efecto de lo que ocurre en la región del pasado. La causalidad Einsteiniana es una conexión entre el pasado y el futuro (De La Torre, 2006).

- **Intervalo como de luz:** Para que Δs^2 sea cero debe cumplirse que: $\Delta s^2 = c^2(\Delta t)^2 - (\Delta r)^2 = 0$.

Los sucesos conectados por un intervalo de este tipo solo pueden estar conectados por una señal luminosa. Este tipo de intervalo identifica a las partículas que se mueven a velocidades cercanas a la velocidad de la luz y que están justo en el cono de luz.

- **Intervalo como de espacio:** Para que Δs^2 sea negativo debe cumplirse que: $\Delta s^2 = c^2(\Delta t)^2 - (\Delta r)^2 < 0$.

En los eventos conectados por un intervalo como de espacio se pueden presentar dos situaciones: La primera, es que ninguno de los eventos puede considerarse causa o efecto del otro, debido a que ninguna señal puede transmitirse entre ellos. Y la segunda, es que si dos eventos tienen este tipo de intervalo y son simultáneos, entonces quiere decir que la señal que se transmite entre los eventos viaja más rápido que la luz.

Dado lo anterior, se puede observar que la velocidad de la luz pone un tope a la velocidad de propagación de efectos debidos a cualquier causa. Para poder establecer una relación causa-efecto, hemos visto que se precisa que $c|\Delta t| > |\Delta r|$. Sea V_E la velocidad de propagación de cualquier efecto que se origine debido a un evento causal. Se tendrá que $c|\Delta t| > |\Delta r| = V_E \Delta t$, simplificando se obtiene que $c > V_E$. Al parecer, no hay posibilidad de transmitir nada a mayor velocidad que c dadas las transformaciones de Lorentz, pero este criterio de la relatividad especial estuvo en riesgo con el descubrimiento del fenómeno de entrelazamiento cuántico.

Análisis del intervalo como de espacio a propósito de la localidad y el fenómeno de entrelazamiento:

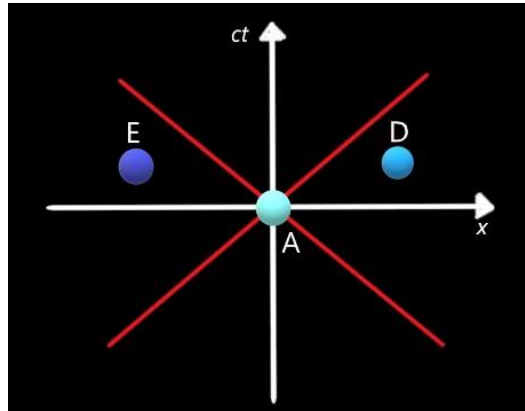


Figura 3.5 Representación de los conos de luz en la geometría de Minkowski con los eventos E y D conectados por un intervalo como de espacio.

En el intervalo como de espacio (ver figura 3.5) una señal que parta de A no puede alcanzar a E o D. Lo que sucede en A no puede influir en E o D y A no está conectado causalmente con E y D, se puede decir que esas zonas del espacio están absolutamente separadas de A.

Bohr pensaba que la causalidad Einsteiniana no era la única posible, admitía la posibilidad de que hubiera también correlaciones cuánticas que no están mediadas por señales de luz. Bohr creía que dos sucesos en E y D pueden estar correlacionados sin necesidad de una señal de luz que viaje desde un evento hasta el otro. Es por esta razón que Bohr defendía el entrelazamiento como un fenómeno real en el cual se cumplía otro tipo de causalidad.

En relación con este fenómeno y la ejemplificación de la sección 3.2, los experimentos demuestran que desde el punto de vista del observador en el laboratorio, en el preciso instante que se mide un fotón, el otro fotón adopta inmediatamente la misma propiedad de polarización. Si alguna influencia estuviera viajando desde el fotón que se mueve hacia la izquierda al fotón que se mueve hacia la derecha, para avisarle que se había determinado la polarización del fotón izquierdo mediante una medida, esta tendría que viajar entre ambos fotones instantáneamente, lo que ocasionaría un conflicto con la velocidad límite establecida por la relatividad especial.

En este sentido, si la mecánica cuántica muestra que las partículas adquieren esta o aquella propiedad cuando son medidas, entonces se debe aprender que la aleatoriedad puede tener vínculos

a través del espacio. Pares de partículas entrelazadas no adquieren sus propiedades medidas de forma independiente. Son como un par de dados, por ejemplo, uno es lanzado en Bogotá y el otro en Medellín, cada uno de los cuales aleatoriamente da un número u otro, pero de tal forma que los dos números siempre coinciden. Las partículas entrelazadas actúan de forma similar y no lo hacen mágicamente, las partículas entrelazadas, incluso si están espacialmente separadas, nunca actúan de forma autónoma.

Ahora bien, según la relatividad especial, este fenómeno es no-local ya que implica que una de las partículas se encuentra fuera del cono de luz de la otra dando lugar a interacciones que al parecer viajan a una velocidad mayor a la velocidad de la luz. Cualquier otro sitio, que no es una parte integrante de los conos de luz, es la región del espacio-tiempo que queda fuera de los conos de un evento dado (un punto en el espacio-tiempo). Los eventos que están en cualquier otra parte, alejados unos de otros, son mutuamente inobservables, y no pueden ser conectados causalmente.

Es por esta razón que Einstein, Podolsky y Rosen plantean el entrelazamiento como un argumento para mostrar que la mecánica cuántica es una teoría incompleta. Einstein aseguraba que este fenómeno predicho por la mecánica cuántica es inconsistente con el principio de localidad, debido a que, como ya se mencionó, no se puede afectar una partícula que se encuentre fuera de su cono y, por lo tanto, viaje más rápido que la luz.

El consenso entre la comunidad de físicos es que este conflicto aparente con la relatividad especial es ilusorio. La razón intuitiva es incluso: si los dos fotones están espacialmente separados, su origen común establece un vínculo fundamental entre ellos. Aunque se alejan uno de otro y se hacen espacialmente separados, siguen formando parte de un sistema físico. De modo que no se trata realmente de que una medida sobre un fotón “obligue” a otro fotón distante a adoptar propiedades de polarización idénticas. Más bien, los dos fotones están tan íntimamente ligados que está justificado considerarlos, incluso si están espacialmente separados, como partes de una entidad física (Greene, 2004). Entonces se puede decir que una medida sobre esta única entidad “una entidad que contiene dos fotones” afecta a la entidad entera, es decir, afecta a ambos fotones a la vez. Es así como el argumento de EPR nos obliga a introducir un nuevo concepto: la no separabilidad. Las partículas no pueden siempre describirse como entidades completamente independientes, sino deben a veces considerarse como elementos de un todo.

La idea anterior aunque sea más intuitiva, es en algunas ocasiones vaga. Un argumento más preciso podría ser el siguiente: Cuando la relatividad especial dice que nada puede viajar más rápido que la velocidad de la luz, el “nada” se refiere a la materia o la energía. Pero lo que tenemos ahora es más sutil, porque en el fenómeno de entrelazamiento, no parece que ninguna materia o energía esté viajando entre los dos fotones, y por ello no hay nada cuya velocidad se tenga que medir. No obstante, hay una forma de saber si se ha tenido conflicto con la relatividad especial.

Una característica común de la materia y la energía es que cuando viajan de un lugar a otro pueden transmitir información. Por ejemplo, los fotones que viajan por la fibra óptica hasta los computadores en las casas llevan información. Así, en cualquier situación donde se supone que algo, incluso algo no identificado, ha viajado más rápido que la velocidad de la luz se hace necesario realizar un test sencillo. Este test consiste en preguntar si se ha transmitido información o no (Greene, 2004). Si la respuesta es no, sigue vigente el razonamiento mencionado anteriormente, entonces nada ha superado la velocidad de la luz, y la relatividad especial no se cuestiona. En la práctica, esta es la prueba que suelen hacer los físicos para determinar si algún proceso de la naturaleza ha violado las leyes de la relatividad especial.

Ahora bien, no hay forma de enviar información de un fotón al otro porque el resultado encontrado en cualquiera de los detectores es simplemente una secuencia aleatoria de resultados, ya sea polarización-vertical o polarización-horizontal, puesto que en cualquier medición dada, existe la misma probabilidad de que el fotón se encuentre en un estado $|V\rangle$ o $|H\rangle$. De ninguna manera se puede controlar o predecir el resultado de cualquier medida concreta.

Bajo este contexto, el argumento estándar de la mecánica cuántica afirma que aunque medir la polarización de un fotón parece instantáneamente afectar al otro, ninguno se transmite información de uno a otro y la velocidad límite de la relatividad especial sigue en vigencia. En general, tampoco hay transmisión de energía porque esta permanece invariante en cada partícula. Lo único que podría alterar la energía total sería la interacción gravitacional, electromagnética o nuclear de alguna de esas partículas con una tercera. Pero en ese caso ya no nos encontraríamos ante una correlación a distancia sino ante una de las interacciones ya bien conocidas por la física (Aleman, 2011). La mecánica cuántica afirma que los resultados de la polarización están entrelazados, pero no están en una relación causa-efecto convencional porque no hay nada que viaje entre los dos lugares distantes.

Por último, es importante recordar que, el colapso de la onda de probabilidad sucede instantáneamente en todo el universo: una vez que se encuentra la partícula aquí, dice el argumento, la probabilidad de que sea encontrada en cualquier otro lugar cae inmediatamente a cero, y esto se refleja en un colapso instantáneo de la onda de probabilidad (Greene, 2004). En ese sentido, por muy lejos que se encuentren los fotones, la onda de probabilidad del fotón que viaja en una dirección, será afectada instantáneamente por la onda de probabilidad del fotón que viaja en dirección contraria, lo que asegura que tengan la misma polarización. Así, en la mecánica cuántica estándar es este cambio instantáneo en las ondas de probabilidad, el responsable de la aparente influencia más rápida que la luz.

3.4 Propuesta experimental a propósito del caso EPR

Como se mencionó en el segundo capítulo, es importante pensar en la relación teórico-experimental como una relación constitutiva ya que gracias al carácter experimental, se puede evidenciar los efectos de los fenómenos y modificar las explicaciones que nos brinda la teoría de estos. En ese sentido, cuando el objetivo es el aprendizaje de un tópico en la física, en este caso de mecánica cuántica, la actividad experimental juega un papel importante al momento de buscar que se comprenda determinada noción o concepto.

Ahora bien, si la actividad experimental busca ser una alternativa para la construcción de conocimiento, es pertinente preguntarse: ¿Qué fenómeno conviene presentar al estudiante? (Bautista, 1990, pág. 12) menciona que “para seleccionar los fenómenos presentados en el aula, se debe pensar en aquéllos que sean fundamentales de acuerdo con el desarrollo que se esté dando a una teoría. Es decir, los fenómenos cuyo tratamiento sea importante para evidenciar la necesidad de un cambio de concepción o construcción de una nueva teoría e imagen del mundo. Si se logra que el estudiante los interprete y vea la necesidad de una nueva teoría, se habrá logrado un avance significativo”. Es por esta razón que la actividad experimental cambia radicalmente su función de elemento comprobatorio a elemento de reflexión para la construcción del conocimiento.

Resulta conveniente presentar los fenómenos de la mecánica cuántica a los estudiantes ya que los obliga a reformular explicaciones y conceptos que están muy arraigados en la experiencia cotidiana. La conceptualización o formalización de un sistema cuántico requiere ingresar en un

nuevo dominio explicativo y aceptar que existe una forma distinta de ver la naturaleza física que desafía a la actual que hemos construido con la experiencia macroscópica.

Adicional a esto, (Moreira & Greca, 2004) mencionan que muchos alumnos pasan por cursos de mecánica cuántica sin apropiarse verdaderamente de los significados de los conceptos básicos de esta área precisamente porque usan los conceptos de la mecánica cuántica como subsumidores para dar significado a los nuevos conceptos. Es decir, que los conocimientos preexistentes de los alumnos relacionados con la física clásica funcionan como obstáculos representacionales y hacen que el alumno intente dar explicaciones de los fenómenos cuánticos con derivaciones de los conceptos clásicos. Es por esta razón que se hace innecesario hacer comparaciones o analogías con la física clásica porque son dos esquemas totalmente diferentes.

Debido a lo anterior, resulta de gran importancia trabajar en la construcción de nuevas estrategias de enseñanza que permitan abordar temas alrededor de la mecánica cuántica en los cursos introductorios de física en la universidad, con el fin de influir en la formación inicial de los profesores y a la vez romper con el paradigma newtoniano que ha imperado e influido en nuestro pensamiento y la manera de ver el mundo desde el siglo XVII hasta nuestros días (Clavijo, Walteros, & Cortés, 2019).

Desde el trabajo de investigación se propone una perspectiva fenoménica en donde la actividad experimental tiene un enfoque cualitativo y un papel de vital importancia en la apropiación de conceptos. Bajo esta perspectiva, la actividad experimental es comprendida como el espacio que le permite a los estudiantes hacer diferentes interpretaciones alrededor del fenómeno para explicarlo. El estudiante formaliza una noción cuando construye un conjunto de palabras que caracterizan aspectos o cualidades de los efectos observados. Estas actividades pueden ser una alternativa de aprendizaje para que los estudiantes logren la ampliación de su experiencia y la formalización de fenomenologías, en este caso particular, la construcción de explicaciones que nos lleven a la noción de entrelazamiento cuántico.

Por último, se clarifica, además, que las actividades propenden por el abandono del proceder clásico de conocer, lo cual es una oportunidad para configurar una nueva forma de ver la realidad física fundamentada en un conocer cuántico, por lo tanto, la explicación del fenómeno exige desligarse por completo de las ideas clásicas y construir una nueva explicación en torno a un

pensamiento cuántico, es decir, que los estudiantes puedan hablar de un nuevo esquema de la física que es totalmente diferente a la física clásica.

3.4.1 Descripción de las actividades experimentales

Los efectos de los fenómenos observados en las actividades experimentales son de gran relevancia ya que se realizan con la intención de construir una base conceptual que permita a los estudiantes comprender el fenómeno de entrelazamiento cuántico. Con las actividades se espera que el estudiante construya explicaciones y relaciones para hablar del fenómeno que está observando como una manera de formalizarlo. Si el lector lo desea, puede consultar la cartilla en el Apéndice A, que es la que consigna los aspectos más relevantes de la investigación, las actividades experimentales que a continuación se proponen, preguntas orientadoras y la actividad de socialización para el trabajo de los estudiantes en el aula.

Actividad Preliminar: Localidad

El objetivo de esta actividad experimental se enfoca en mostrar a qué se refería Einstein en su artículo de EPR cuando hablaba del principio de localidad. Con la actividad se busca que los estudiantes construyan explicaciones en relación con la localidad y el segundo postulado de la relatividad especial dado que fue uno de los argumentos de Einstein para decir que la mecánica cuántica era incompleta.

✓ El diseño de la actividad experimental que se plantea se constituye de dos embudos de plástico del mismo tamaño, dos pelotas, cinta adhesiva y pintura. Para el primer momento, se cubrirá con cinta adhesiva la abertura pequeña inferior de cada uno de los embudos, de tal forma que cuando se ponga la pintura dentro del embudo, esta no se derrame. La disposición de los materiales se muestra en la figura 3.6.

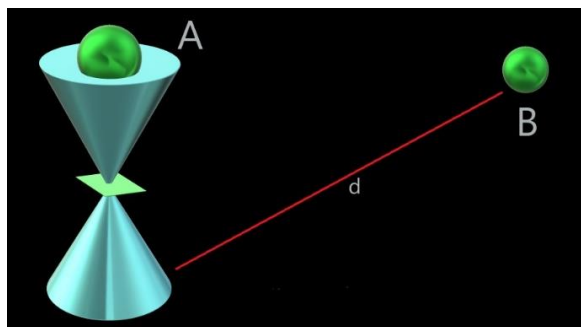


Figura 3.6 Disposición de los conos para el primer momento de la actividad de localidad

Es importante poner de manifiesto que la disposición de los embudos mencionada anteriormente se realiza con el propósito de construir una representación del espacio-tiempo de la geometría de Minkowsky para ilustrar el argumento del principio de localidad desde la teoría relativista. Los embudos serán el análogo a los conos de luz. El embudo superior representará el futuro, el inferior el pasado y la unión de los dos, el presente.

Una vez dispuestos los embudos en forma de “cono de luz”, se pondrá una cantidad considerable de pintura dentro del cono futuro (embudo superior). Adicionalmente, una pelota A se ubicará en el interior del cono junto con la pintura. Una segunda pelota B, se ubicará a una distancia significativa de nuestro cono de luz (si se dispone del salón de clase, ubicar los embudos en un extremo y la pelota B en el otro). Ahora bien, luego de este procedimiento ¿Qué sucede con cada una de las pelotas, son afectadas por la pintura? ¿Por qué?

✓ Para el segundo momento, se tomará la pelota B que se encontraba distanciada del cono de luz y se ubicará junto con la pelota A en el cono futuro (embudo superior). La disposición de los materiales se realiza como se observa en la figura 3.7 ¿Qué sucede con cada una de las pelotas, son afectadas por la pintura? ¿Por qué?

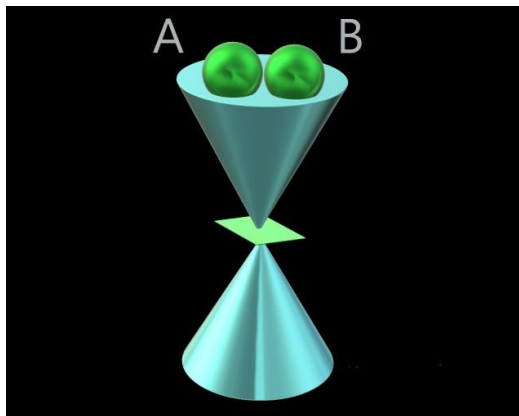


Figura 3.7 Disposición de los conos para el segundo momento de la actividad de localidad

Formalización conceptual del principio de localidad:

En el primer momento, se observa que la pelota A se mancha con la pintura que se encuentra dentro del cono de luz futuro, mientras que B, que estaba a una distancia significativa permaneció intacta, no fue afectada por la pintura que estaba contenida en el cono. Con respecto al segundo momento, la pelota B había permanecido intacta hasta que se ubicó dentro del cono

futuro junto con A, es decir, las dos pelotas fueron afectadas por la pintura hasta que se ubicaron en el mismo cono, el cono de luz futuro (embudo superior).

Para Einstein, como ya se ha mencionado anteriormente, la velocidad de la luz era el límite de la naturaleza sobre la rapidez con que algo podía viajar de un lugar a otro. Era inconcebible que una medición o acción realizada en la partícula A afectara instantáneamente, a distancia, la magnitud física que posee la partícula B. En el primer momento, la única partícula que fue afectada por la pintura fue la partícula A debido a que B se encontraba fuera del cono y además, a una distancia significativa, por lo tanto B todo el tiempo permaneció intacta. Por otro lado, en el segundo momento, la partícula B ya no estaba alejada del cono sino que por el contrario, se ubicó junto con la pelota A que era la que ya había sido afectada por la pintura.

Los efectos observados de esta actividad experimental son muy parecidos al argumento del principio de localidad desde la relatividad. Es preciso recordar que la interacción o perturbación entre un sistema de dos partículas tiene lugar sólo dentro del cono de luz de una de ellas. Dicha interacción entre el sistema de partículas sólo puede viajar máximo a la velocidad de la luz, es decir, se pueden afectar las partículas entre sí, siempre y cuando estas se encuentren dentro del mismo cono de luz.

De no ser así, no habría ningún tipo de conexión causal entre las partículas, como sucedió con las pelotas en el primer momento, no hubo ninguna causa (pintura) que afectara la pelota B porque sencillamente se encontraba fuera del cono de A, que era el que contenía la pintura. Por el contrario, en el segundo momento, si hubo una conexión causal porque las dos pelotas se encontraban dentro del mismo cono, por lo tanto lo que perturbaba a A también podía afectar a B, para ser más precisos, ser manchadas por la pintura contenida.

Para que el sistema sea local en nuestro caso particular, implica que tanto la pelota A, como la B deben estar en el mismo cono de luz para que puedan interactuar entre sí. Ahora bien, si los eventos mencionados anteriormente eran locales, la no-localidad implica que una de las partículas se encuentra fuera del cono de luz de la otra dando lugar a interacciones que aparentemente viajan a una velocidad mayor a la velocidad de la luz y que no tienen una conexión casual, según el segundo postulado de la relatividad especial.

Actividad Dos: Estados Entrelazados

Esta actividad experimental tiene como propósito que los estudiantes relacionen, comprendan y construyan explicaciones en torno a los efectos que se observan en el entrelazamiento en polarización de dos fotones y su relación con el principio de localidad. El diseño que se plantea para esta actividad se constituye de un láser violeta ($\lambda=405\text{nm}$), un cristal BBO tipo II no lineal (cristal de beta borato de bario), tres placas lambda medios ($\lambda/2$), dos espejos, un divisor de haz polarizador y dos fotodiodos de avalancha. La identificación de las componentes para la actividad experimental está consignada en la tabla 1 y la disposición de las mismas se realiza como se observa en la figura 3.7.

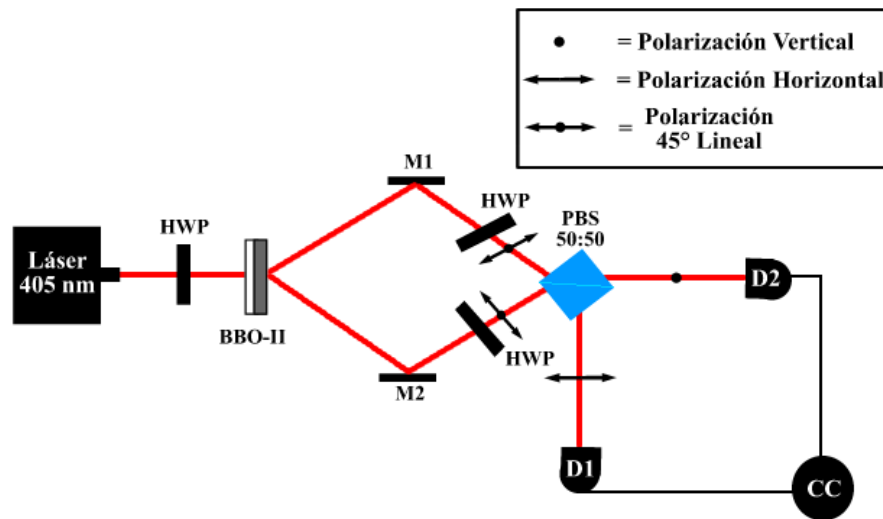


Figura 3.7. Disposición de los elementos para la actividad experimental de fotones entrelazados en polarización

Tabla 1. Identificación de las componentes para la actividad experimental

Abreviación y nombre en inglés	Nombre de la componente en español
Violet Laser ($\lambda=405\text{nm}$)	Laser violeta con longitud de onda 405nm
Half-Wave Plate (HWP)	Placa lambda medios o placa de media onda
Crystal Beta Barium Borate (BBO-II)	Cristal de borato de bario tipo II no lineal
Mirrors (M1; M2)	Espejos
Polarizing Beam Splitter (PBS)	Divisor de haz polarizador
Avalanche Photodiodes (D1; D2)	Fotodiodos de avalancha

Fuente: Elaboración propia

Es importante clarificar que en la actividad experimental, los fotones que salen del bombeo láser serán tomados como un ensamble. Un ensamble es una colección de sistemas físicos idénticamente preparados. Si todos y cada uno de los sistemas del ensamble están en el mismo estado entonces se denomina un ensamble puro (Spinel, 2009).

A modo de descripción general, en esta actividad experimental se utiliza como fuente inicial de fotones un láser violeta con una longitud de onda de 405nm. Este incide en una placa de $\lambda/2$ medios (HWP) o lámina de media onda. Esta placa rota la polarización tanto como se desee de tal manera que será la encargada de obtener el estado de polarización necesario para que coincida con el eje óptico del cristal BBO-II y se obtenga la máxima generación de fotones, esto se conoce como empatamiento de fase (phase-matching).

Posteriormente este haz de luz incide en el cristal de borato de bario (BBO-II) en donde mediante un proceso llamado conversión paramétrica espontánea descendente (SPDC) se emitirán dos nuevos haces correspondientes a los fotones llamados “Signal” y “Idler”. Estos nuevos fotones serán infrarrojos ya que tendrán una longitud de onda de 810 nm. Este es un proceso paramétrico, por lo tanto, la energía incidente se transfiere totalmente a los fotones generados, esto quiere decir que la suma de las energías de cada uno de los fotones es igual a la del bombeo inicial de acuerdo con la ley de conservación de la energía.

Cuando se mide la polarización de los dos fotones emitidos espontáneamente del cristal BBO-II se encuentra que estos, convencionalmente, tienen una polarización perpendicular entre ellos, esto es, si se realiza una medición y uno tiene polarización vertical, su compañero debe tener polarización horizontal, esto quiere decir que uno de los fotones generados habrá de tener la misma polarización que los fotones del bombeo inicial antes de incidir en el cristal. Ahora bien, el fotón que sale “hacia arriba” (o por un brazo) incidirá en el espejo M1 y el fotón que sale “hacia abajo” incidirá en el espejo M2, esto se hace con el propósito de modificar la trayectoria de los fotones para que incidan en el divisor de haz polarizador (PBS). Antes de que los fotones lleguen al PBS, cada uno se encontrará nuevamente con una placa $\lambda/2$ medios (HWP) que hará que su polarización rote 45° grados con respecto a la polarización que originalmente tenían, esto quiere decir que estarán en una superposición de los estados de polarización vertical y horizontal.

Al llegar al PBS, como los fotones están en superposición, lo que hará este dispositivo es “borrarla” ya que dividirá el haz que entra por cada uno de sus canales en dos de tal forma que la

mitad de la luz es transmitida y la otra reflejada. A la salida del PBS, precisamente como se ha borrado la superposición, saldrá un fotón polarizado horizontalmente hacia el detector D1 y uno polarizado verticalmente hacia el detector D2.

Adicionalmente, si se quisiera obtener el mismo estado de polarización tanto en el detector D1 como en el detector D2 (como en el ejemplo de Alice y Bob de la sección 3,2), se debe hacer una modificación previa en la polarización de uno de los fotones generados espontáneamente en el BBO-II. Esa modificación consiste en ubicar una placa de lambda medios (HWP) en su camino, con el propósito de rotar la polarización de cualquiera de los fotones tanto como se desee. En este caso, la placa puede rotar la polarización 90° de tal forma que si se quiere, por ejemplo, que la polarización de los dos fotones sea vertical, entonces el fotón que emerge con una polarización horizontal incidirá en la placa (HWP) para que esta rote su polarización y se pueda decir, finalmente, que los dos fotones mostrarán el mismo estado de polarización al momento de ser detectados.

Por último, los detectores son fotodiodos de avalancha que detectan los fotones y que están conectados a tarjetas de programación o contadores que envían a una interfaz (laboratorio virtual) información sobre las coincidencias en el registro simultaneo de los fotones “Signal” y “Idler” que llegan a cada uno de los detectores. Esta interfaz puede ser creada mediante Matlab, Python, C++ o cualquier entorno de programación. LabVIEW es de los más sencillos por su programación de tipo diagrama.

Formalización conceptual de la actividad experimental:

En relación con el cristal BBO, esta es una estrategia muy común para la producción de pares de fotones entrelazados a temperatura ambiente mediante el uso de la conversión paramétrica espontanea descendente (SPDC por sus siglas en ingles) que puede ocurrir en un cristal no lineal, la cual tiene aplicaciones importantes en la tecnología actual y diversas áreas de estudio. La conversión paramétrica espontanea descendente es un método muy empleado en la construcción de fuentes de pares de fotones ya que puede ser usado para obtener estados fotónicos entrelazados primordialmente espacial, temporal o en frecuencia (Riquelme, 2017).

En la conversión paramétrica espontanea descendente, aunque la mayor parte de la luz que incide sobre el cristal lo atraviesa directamente, un pequeño porcentaje de esa luz no lo hace. Esta

minoría de fotones sufre una extraña transformación: cada fotón que no atraviesa directamente el cristal “se fragmenta” en dos fotones; es decir, cada uno de esos fotones interactúa con la red cristalina, de un modo que la ciencia aún no entiende del todo, y esta interacción da lugar a un par de fotones. Cuando el fotón sufre esa transformación, la suma de las frecuencias de los dos fotones resultantes es igual a la frecuencia del fotón original. Los fotones de un par producido de esta forma están entrelazados (Aczel, 2008)

Se dice que la SPDC es “espontánea” debido a que no hay señal de entrada o campo para estimular el proceso, sino que el par de fotones es generado espontáneamente dentro del cristal. El proceso es “paramétrico” porque depende de los campos eléctricos (y no solo de sus intensidades), implicando que existe una relación de fase entre los campos de entrada y salida. Y, “conversión descendente” hace referencia al hecho de que los fotones creados, “Signal” y “Idler” siempre tienen frecuencias menores que el bombeo inicial (Aceves, 2016).

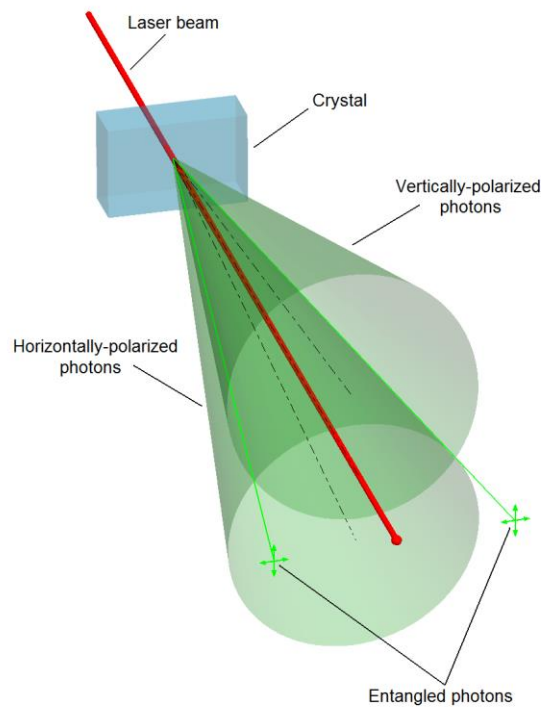


Figura 3.8. Esquema de SPDC tipo II (Zeilinger, 2011)

Cabe destacar que la importancia del proceso radica en las aplicaciones como fuente de luz de fotones entrelazados y en la actividad experimental se obtendrán fotones correlacionados en polarización. Este es directo de la SPDC del tipo II, puede producir una configuración colineal y

no colineal en un cristal degenerado o no degenerado, donde mediante una selección posterior en la cual se considera solamente la intersección de los conos producidos, se obtienen dos fotones de estados de polarización entrelazados. Para el caso particular de nuestra actividad experimental se obtendrán dos conos no-colineales con SPDC tipo II.

Ahora bien, si el láser que se va a usar en la actividad experimental es de 405nm, se producirá un par de fotones de luz infrarroja de 810nm de acuerdo con la teoría y la conservación de la energía, la frecuencia de los fotones resultantes depende de la frecuencia del bombeo inicial. Es importante poner de manifiesto que el estado de los fotones gemelos generados en la SPDC es llamado estado bifotónico debido a su correlación en un grado de libertad, la polarización. No se puede pensar en el par de fotones de forma individual ya que su naturaleza no es separable, es importante darse cuenta de que las partículas en ese estado no tienen por qué estar unidas localmente entre sí, simplemente se comportan como una misma entidad a pesar de la distancia, tal y como se mencionó en la sección 3.3.

Bajo ese contexto, la luz del bombeo inicial incide en la primera placa de lambda medios (HWP) con el fin de rotar su polarización para que coincida con el eje óptico del cristal BBO-II. Si esto se logra, se tendrán las condiciones más adecuadas para la máxima generación del efecto de la SPDC (emitir un par de fotones espontáneamente). Estas placas se construyen con un material birrefringente (como el cuarzo o la mica), cuyo índice de refracción es diferente para la luz polarizada linealmente a lo largo de uno u otro de dos determinados ejes cristalinos perpendiculares.

Cuando el haz de bombeo sale de la HWP e incide en el cristal BBO-II, se emitirán dos nuevos haces correspondientes a los fotones llamados “Signal” y “Idler” por medio del proceso SPDC tipo II. En este caso será no-colineal debido a que los fotones generados salen con un ángulo diferente al del bombeo inicial. El fotón incidente apenas entra en el cristal BBO-II comienza a generar fotones y esos pares de fotones viajan dentro del cristal a velocidades diferentes debido a sus propiedades de birrefringencia.

Un cristal no-lineal es de carácter birrefringente si presenta al menos dos índices de refracción diferentes en direcciones distintas, dos de ellos en el plano transversal al eje óptico de dicho cristal. Las velocidades de los dos haces polarizados tienen diferentes índices de refracción, el rayo de mayor índice de refracción es el “más lento” mientras que el de índice de menor

refracción es el “más rápido”, lo que nos indica, que existe una separación temporal de uno con respecto al otro aunque este tiempo sea demasiado corto, casi despreciable. Es importante poner de manifiesto que cuando entran los fotones en el cristal BBO-II tienen dos opciones, aniquilarse o convertirse en un par de fotones entrelazados y eso es completamente aleatorio. Por eso se dice que la manera más exitosa de tener un proceso completamente aleatorio es por el proceso de SPDC.

Para que haya una separación temporal muy pequeña entre los fotones generados, se debe usar un cristal BBO muy delgado, de 1mm por ejemplo. Entre más ancho sea el cristal, mayor será la producción de fotones pero el tiempo de separación entre ellos aumenta. Como se mencionó anteriormente, los fotones gemelos emitidos espontáneamente del cristal BBO-II están entrelazados en polarización, estos fotones gemelos tienen una polarización perpendicular entre ellos y uno comparte la misma polarización del bombeo inicial.

Cuando los fotones generados espontáneamente salen del cristal BBO-II, el fotón que sale hacia arriba incidirá en el espejo M1 y el fotón que sale hacia abajo incidirá en el espejo M2, esto se hace con el propósito de modificar la trayectoria de los haces para que incidan en el divisor de haz polarizador (PBS). Cuando los fotones son reflejados por los espejos, llevan una polarización que es perpendicular entre ellos, una polarización que viaja forma de “cruz” que aunque no sepamos cual fotón tiene polarización horizontal o vertical, se sabe que no están en superposición. Ahora bien, antes que los fotones lleguen al PBS, cada uno de los haces incidirá nuevamente en una placa de lambda medios (HWP). La placa creará una superposición debido a que las polarizaciones que se tenían anteriormente (vertical y horizontal) serán rotadas 45° para llegar al PBS, esto quiere decir que la polarización ahora será diagonal y viajará en forma de “equis”.

Posteriormente, la interacción del sistema cuántico (fotones) con el divisor de haz polarizado (PBS), que en este caso es un instrumento de medida macroscópico, es lo que nos va a permitir observar el comportamiento de los fotones y los estados de polarización a los que van a colapsar una vez salen del divisor y llegan a los respectivos detectores para ser observado su estado de polarización. Recordemos que cuando se realiza una medición, se perturba el sistema cuántico de tal manera que lo hace colapsar a un estado particular. En esta parte, al PBS llegan los fotones en superposición debido a que su polarización fue rotada por las placas de lambda medios (HWP) a 45° con respecto a la polarización que tenían. Lo que hará el PBS es comportarse como un observador de tal manera que borrará la superposición y transmitirá la polarización perpendicular

al plano de incidencia y reflejará la polarización paralela al plano de incidencia, de este modo el detector D1 tendrá cuentas de fotones polarizados en la dirección paralela al plano de incidencia y en contraste el detector D2 registrará cuentas de fotones polarizados perpendicularmente al plano de incidencia.

Lo interesante de este proceso es que como los dos fotones son gemelos porque provienen de una misma fuente, si el PBS envía el primer fotón al detector D1 con polarización horizontal, obligatoriamente al siguiente fotón lo enviara al detector D2 con polarización contraria, es decir polarización vertical. Como están entrelazados, uno dictamina la polarización del otro. El PBS también tiene la función de filtro debido a que deja pasar fotones polarizados o vertical u horizontalmente polarizados pero no en superposición, el PBS determina el estado cuántico de polarización que tiene cada fotón incidente. De este modo, la polarización del primer fotón no existiría como realidad física antes de su observación, lo mismo para el segundo fotón.

Esos fotones polarizados llegarán a los detectores que son fotodiodos de avalancha. Estos dispositivos solo detectan fotones, no reconocen si la luz incidente está polarizada. El fotodiodo es muy similar a un diodo semiconductor común, pero tiene una característica que lo hace muy especial: es un dispositivo que conduce una cantidad de corriente eléctrica proporcional a la cantidad de luz que lo incide. Los fotodiodos de avalancha tienen un semiconductor de silicio en el interior y cuando este absorbe un fotón, salta uno de sus electrones a niveles de mayor energía. El silicio detecta luz del espectro visible e infrarrojo, con un ruido de multiplicación bajo. A medida que inciden fotones en el fotodiodo, se van generando saltos de electrones lo que produce, como su nombre lo indica, una avalancha de electrones. Recordemos que los electrones en movimiento producen una corriente, en el caso de este dispositivo, se genera una fotocorriente que a su vez produce pulsos que posteriormente son enviados a la interfaz (programa) como una coincidencia o fotoconteo.

Los fotodiodos de avalancha se conectan a tarjetas de desarrollo (Arduino, por ejemplo) o circuitos de coincidencias, que lo que hacen es contar pulsos de fotocorrientes mediante una programación para esa función. Esto consiste en considerar como un fotoconteo el registro simultaneo de los fotones que llegan tanto a D1 como a D2. En la interfaz se establece una ventana temporal para considerar dicho evento como simultaneo, este tiempo puede ser, por ejemplo, de 100ns, esto es, si dentro de dicho intervalo de tiempo, tanto un fotón “Signal” como uno “Idler”

son registrados, entonces se tiene un fotoconteo. Si llegan 200 fotones en ese tiempo, por ejemplo, entonces 100 debieron provenir de D1 y 100 de D2. Si los detectores tienen el mismo número de conteos entonces los elementos ópticos en la actividad experimental están alineados correctamente.

Como se mencionó anteriormente, a la interfaz electrónica se le debe programar una ventana temporal para que adquiera datos del detector D1 y D2. LabVIEW es un laboratorio virtual en el que se permite crear interfaces de usuario y control de datos, este programa no necesita código ya que se usa mediante programación visual. También se pueden crear interfaces para el control y análisis de este tipo de datos en programas como Matlab y Python.

Ahora bien, luego de haber revisado qué sucede en la actividad experimental, analicemos qué significa que los dos fotones estén entrelazados en polarización. Cuando dos fotones están entrelazados se hace referencia a una indistinguibilidad en algún grado de libertad de estos, como en este proceso SPDC tipo II se están generando fotones con polarización vertical y horizontal en forma de conos, cuando estos conos se intersecan en dos puntos (visualizar figura 3.8), esos puntos dan cuenta de los fotones entrelazados. Si se ubicara un detector en cualquiera de los dos puntos, el detector u observador no tiene forma de saber si los fotones que está midiendo hacen parte del cono de arriba o del cono de abajo precisamente porque la polarización vertical está superpuesta con la horizontal. Ahora bien, en ¿cuáles partes del cono no hay fotones entrelazados? Si se ubicara el detector en la parte superior del primer cono, allí no habría fotones entrelazados porque es bien sabido que los fotones que se están observando tienen polarización vertical (de acuerdo con la figura 3.8) y en contraste, si disponemos de otro detector en la parte inferior del segundo cono, se sabrá que tiene polarización contraria. En ese sentido, si se quiere medir la polarización en los dos puntos de intersección de los conos, no habrá forma de saberlo, es indistinguible, es por esta razón que se afirma que los fotones están entrelazados en polarización.

Con el propósito de cerrar el trabajo de investigación es preciso mencionar algunos aspectos de gran relevancia:

La actividad experimental cobra relevancia en la construcción de conocimiento porque logra ser el espacio que le permite a los estudiantes hacer diferentes interpretaciones y relaciones alrededor del fenómeno para explicarlo. Como se mencionó anteriormente, el estudiante formaliza una noción cuando construye un conjunto de palabras que caracterizan aspectos o cualidades de

los efectos observados. Las actividades experimentales pueden ser una alternativa de aprendizaje para que los estudiantes logren la ampliación de su experiencia y la formalización de fenomenologías, en este caso particular, la construcción de explicaciones que nos lleven a la noción de entrelazamiento cuántico.

Por otro lado, a pesar de que Einstein aseguraba que el entrelazamiento era inconsistente con el principio de localidad porque no se puede afectar una partícula que se encuentre fuera de su cono y, por lo tanto, que viaje más rápido que la luz, en este fenómeno, no hay transmisión de materia, energía o información de ninguna clase entre las partículas, por lo tanto no hay nada cuya velocidad pueda superar a la de la luz.

La hipótesis hecha por Einstein, Podolsky y Rosen, por muy razonable que parezca, no puede responder a la forma como se comporta nuestro universo cuántico. Para comprenderlo, nosotros, seres humanos reales, dependemos de “elementos de realidad”, como lo afirmaba Einstein, pero, como el teorema de Bell y los experimentos de Aspect nos han mostrado, tales elementos de realidad sencillamente no existen.

“Así, pues, aunque la opinión de la comunidad científica sostiene que hay una coexistencia armoniosa, algunos físicos y filósofos considera que la relación exacta entre mecánica cuántica, partículas entrelazadas y relatividad especial es una cuestión abierta. Es ciertamente posible, que la opinión de la mayoría prevalezca en última instancia en alguna forma más definitiva. Pero la historia muestra que los problemas fundacionales sutiles siembran a veces las semillas de revoluciones futuras. Sobre esta problemática, solo el tiempo lo dirá...” (Greene, 2004, pág. 163).

Conclusiones

1. A lo largo del desarrollo de la ciencia en la historia, la experimentación ha sido clave en la construcción de nuevas teorías. En el contexto de la física en particular, las actividades experimentales así como la teoría juegan un papel muy importante en la construcción de conocimiento y, es por esto, que es preciso considerar como constituyente en la relación teoría-experimento.
2. Dentro del contexto de la ciencia se ha observado que las actividades experimentales desde el enfoque cualitativo o cuantitativo son igual de importantes en la construcción de explicaciones en torno a los fenómenos. Es preciso destacar que la medición y toma de datos no siempre es crucial para la formulación de nuevas teorías. Las explicaciones, relaciones, palabras, símbolos que se construyen en torno a un fenómeno desde el enfoque cualitativo, también logran ser una alternativa que contribuye a la formalización de fenómenos y conceptos.
3. Desde la perspectiva fenoménica se permite formalizar fenómenos y conceptos a partir de la experiencia sensible que se tiene de estos en las actividades experimentales. Las interpretaciones y explicaciones que se realizan en torno a un fenómeno cambian de acuerdo con los criterios y experiencia que tiene cada uno de los sujetos y, por lo tanto, no se espera buscar una definición absoluta sino un acercamiento conceptual.
4. La actividad experimental es pertinente porque busca que el estudiante tenga una visión de la física más práctica, real y ampliada de los fenómenos. Por un lado, el estudiante logra un entendimiento del método científico y una interpretación más completa del fenómeno, y por el otro, el maestro fortalece habilidades y ese interés asiduo por la ciencia con lo que presentara al estudiante una física más práctica y emocionante.
5. El advenimiento de la mecánica cuántica constituye un hito en la evolución intelectual de la especie humana, y en consecuencia, la academia es un ámbito apropiado para invitar a que los estudiantes la conozcan. La conceptualización o formalización de un sistema cuántico requiere ingresar a una nueva manera de conocer y aceptar que existe una nueva

cosmovisión de la naturaleza que desafía a la actual que hemos construido con la experiencia sensible.

6. Los experimentos realizados desde la publicación del artículo EPR han demostrado que la “acción fantasmal a distancia” realmente existe, con lo que el argumento de Einstein y sus colaboradores no puede derrotar a la mecánica cuántica. Aunque aún hay diferencias en la interpretación de la teoría, la opinión prevalente es que, efectivamente la realidad no es local ni absoluta y, por lo tanto, se podría decir que hasta ahora Bohr y la interpretación de Copenhague han ganado el debate.
7. Aunque aún queda mucho por demostrar y probar del fenómeno de entrelazamiento, los científicos se proponen darle un uso especial, pues es el inicio de lo que ellos creen que será una nueva era de la física. Con el entrelazamiento será posible transmitir información cuántica a años luz de distancia instantáneamente, haciendo que la computación cuántica y los viajes interestelares sean una realidad cada vez más cercana.
8. Es posible diseñar actividades experimentales que permitan un acercamiento a efectos desde los cuales se pueda hablar de nociones como estado, separabilidad, realidad localidad y entrelazamiento en la mecánica cuántica, haciendo uso de elementos ópticos de fácil adquisición para los estudiantes de ciencias en la universidad.

Referencias

- Aceves, U. (2016). Desigualdades de Bell: un experimento sencillo para licenciatura. *Revista Mexicana de Física*, 73-77.
- Aczel, A. (2008). *Entrelazamiento: El mayor misterio de la física*. Drakontos.
- Aleman, R. (2011). Relatividad Especial y Teoría Cuántica: ¿Son Realmente Compatibles? . *Thémata Revista de Filosofía* , 66-78.
- Arancibia, J., & Cádiz, F. (2011). Ayudantía 2: Mecánica Cuántica: Ecuación de Schrodinger. *School of Engineering, Pontificia Universidad Catolica de Chile*, 1-23.
- Bautista, G. (1990). ALGUNAS CONSIDERACIONES PARA LA ENSEÑANZA DEL ELECTROMAGNETISMO . *Revista Física y Cultura. Universidad Pedagógica Nacional* .
- Bell, J. (1964). On the Einstein Podolsky Rosen Paradox. *Physics* , 195-200.
- Beltran, L. M., & Gonzales, J. (2002). EXPERIMENTOS CUALITATIVOS. UNA FORMA DE ABORDAR EL ELECTROMAGNETISMO. *Tecné Episteme Y Didaxis TED*, <https://doi.org/10.17227/ted.num12-5969>.
- Borja, E. F. (2013). Y El Experimento De La Doble Rendija Se Hizo Realidad. *Investigación Y Ciencia* .
- Burbano, P. P. (2001). REFLEXIONES SOBRE LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA. *Universitas Scientiarum*, 55-59.
- Clavijo, M. R., Walteros, A., & 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*, 191-206.
- Cózar, J. M. (2003). Las fronteras de la Física . *Antonio Fernández Rañada* , 9-13.
- De La Peña, L. (2000). Albert Einstein: Navegante Solitario. 56-71.
- De La Torre, L. (2006). *Relatividad*. Medellín, Colombia.
- Dirac, P. (1958). *Principios de Mecánica Cuántica*. Oxford: Oxford University Press.
- Einstein, A., Podolsky, B., & Rosen, N. (1935). Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Physical Review*, 777-780.
- Einstein, A., Rosen, N., & Podolsky, B. (1935). Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Physical Review*, 777-780.
- Fanaro, M. D. (2009). “La Enseñanza de la Mecánica Cuántica en la Escuela Media” (Tesis Doctoral). *Programa Internacional de Doctorado, Universidad de Burgos*, 5.

- Fanaro, M. d., Arlego, M., & Otero, M. R. (2007). El método de caminos múltiples de Feynman como referencia para introducir los conceptos fundamentales de la mecánica cuántica en la escuela secundaria. *Enseñanza de la Física* , 233-260.
- Ferreiros, J., & Ordoñez, J. (2002). HACIA UNA FILOSOFÍA DE LA EXPERIMENTACIÓN. *Revista Hispanoamericana de Filosofía*, 47-86.
- Feynman, R. (1971). *The Feynman Lectures on Physics Vol III: Quantum Mechanics*. EE.UU: Fondo Educativo Interamericano .
- Greene, B. (2004). *The Fabric of the Cosmos: Space, Time, and the Texture of Reality*. United States: Alfred A. Knopf.
- Gurvich, E. O. (2016). ¿Es completa la mecánica cuántica? Replanteando el argumento de Einstein, Podolsky y Rosen. *Centro interdisciplinario de investigación y docencia en educación técnica, México*, 35.
- Hawking, S. (2001). *El Universo en una Cáscara de Nuez* . Planeta Libros .
- Hodson, D. (1994). HACIA UN ENFOQUE MÁS CRÍTICO DEL TRABAJO DE LABORATORIO. *Investigación y experiencias didácticas*, 299-313.
- Kumar, M. (2008). *Quantum: Einstein, Bohr And The Great Debate About The Nature Of Reality*. New York : W. W. Norton & Company.
- Malagón, F., Sandoval, S., & Ayala, M. (2013). La actividad experimental: Construcción de fenomenologías y procesos de formalización. *Praxis Filosófica* , 119-138.
- Malagón, J. F., Ayala, M. M., & Sandoval, S. (2011). *El experimento en el aula, comprensión de fenomenologías y construcción de magnitudes*. Bogotá: Fondo Editorial Universidad Pedagógica Nacional.
- Nielsen, M., & Chuang, I. (2010). *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press.
- Okon, E. (2014). El problema de la medición en la mecánica cuántica . *Revista Mexicana de Física* , 130-140.
- Penrose, R. (1999). *Lo grande, lo pequeño y la mente humana* . Madrid : Cambridge University Press.
- Ramirez, N., Martinez, R., & Fernandez, N. (2010). DOS FORMAS DE ORIENTAR LA INVESTIGACIÓN EN LA EDUCACION DE POSTGRADO: LO CUANTITATIVO Y LO CUALITATIVO . *Revista Pedagogia Universitaria* , 13-28.
- Riquelme, P. O. (2017). Detección de entrelazamiento espacial de fotones generados por el proceso de conversión espontánea paramétrica descendente usando cámara EMCCD. *Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería*, 7-81.

- Rodríguez, M. A., & Cervantes, J. L. (2006). El efecto fotoeléctrico. *Ciencia Ergo Sum*, 303-311.
- Rosenblum, B., & Kuttner, F. (2016). *El Enigma Cuántico: El secreto mejor guardado de la física contemporánea*. Barcelona : Tusquets Editores S.A .
- Rozo, M., Walteros, A., & 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.
- Schmiegelow, C. (2006). Generando Entrelazamiento En Una Cadena XY. *Universidad Nacional de la Plata* , 1-76.
- Skalwold, E., & Bassett, W. (2015). Double Trouble: Navigating Birefringence. *Mineralogical Society of America* , 1-20.
- Spinel, M. C. (2009). *Introducción al formalismo de la mecánica cuántica no relativista*. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- Ubaque, K. Y. (2009). EXPERIMENTO: UNA HERRAMIENTA FUNDAMENTAL. *GONDOLA*, 35-40.
- Walteros, L. (2016). Actividades experimentales para la construcción de explicaciones alrededor de los fundamentos básicos de la mecánica cuántica. *Trabajo de grado UPN*.
- Yin, J. (2017). Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers. *Science*, 1-5.
- Zeilinger, A. (2011). Entirely self-generated using computer graphics applications. *Academy of Sciences, Austria*.

GUÍA DE TRABAJO

ESTADOS ENTRELAZADOS

La actividad experimental como una alternativa para la construcción de explicaciones en torno al fenómeno de entrelazamiento a propósito del concepto de localidad.

XIOMY L. ZAMUDIO
UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL

INTRODUCCIÓN

El aprendizaje de la física debe permitir en el estudiante, la construcción de distintas visiones del mundo y la formación de nuevos valores y criterios acerca de su posición como individuo y ciudadano en torno al avance de la ciencia. Permitirá “un acercamiento a la comprensión del complejo mundo originado por el avance de la tecnología, las crisis sociales y políticas, las reformas religiosas y económicas, las transformaciones materiales y espirituales y las innovaciones de la bioingeniería, cibernética, informática, biofísica y telecomunicaciones, para nombrar sólo algunas áreas del conocimiento, las que repercuten en el comportamiento individual y colectivo de una sociedad” (Burbano, 2001, pág. 56).

La enseñanza de la física debe ser una herramienta para construir un conocimiento más elaborado, sistemático y científico. Para transformar nuestra forma de pensamiento pasivo a uno más crítico y estructurado, todo esto con el fin de formar ciudadanos íntegros que participen y produzcan de la ciencia para el desarrollo de la cultura científica y la sociedad.

Adicionalmente, en la enseñanza de la física moderna y en particular de la mecánica cuántica suele considerarse que, en comparación con los tópicos de la física clásica, los conceptos de la Mecánica Cuántica están demasiado alejados de las percepciones de los estudiantes. Es cierto que estos conceptos modernos desafían ciertas nociones de la realidad que hemos creado a partir de las observaciones cotidianas que tenemos del mundo a escala macroscópica. Sin embargo, existen razones para pensar que el comportamiento del mundo atómico y subatómico tiene diferentes maneras de conocer, siendo este, un hecho que por sí solo justifica incluirlo en la enseñanza (Fanaro, 2009).

Reflexionando acerca de esta problemática, se plantea este guía como una estrategia para el aprendizaje y enseñanza de la física en donde los estudiantes puedan construir explicaciones en torno a los fenómenos que observan en las actividades experimentales. La mecánica cuántica ha generado un gran cambio en nuestra forma de ver la realidad física por eso es importante enseñarla. Esta guía está compuesta por dos actividades experimentales y preguntas que serán una excelente herramienta para que los estudiantes empiecen a configurar su pensamiento clásico y a apropiarse mucho más de los conceptos de la mecánica cuántica, en este caso, entrelazamiento cuántico.



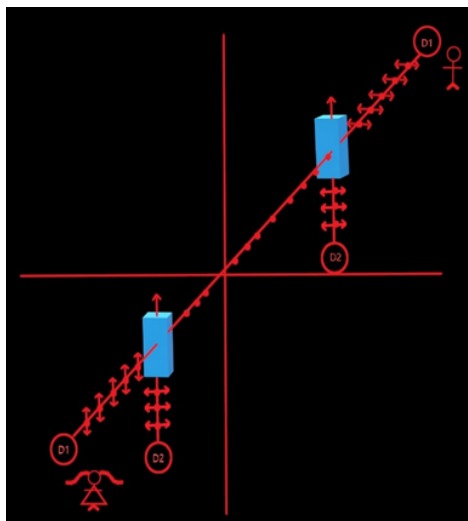
OBJETIVO DE LA GUÍA DE TRABAJO

Las actividades experimentales propuestas en la siguiente guía de trabajo tienen como objetivo ser una estrategia de aprendizaje de la mecánica cuántica, en este caso, de la noción de entrelazamiento y su relación con el concepto de localidad. Con cada una de estas actividades experimentales se espera que el estudiante construya y formalice explicaciones en torno a los efectos que observa del fenómeno.



ENTRELAZAMIENTO CUÁNTICO Y LOCALIDAD

En 1935 Einstein publicó junto a sus colegas Boris Podolsky y Nathan Rosen, un experimento mental que hoy conocemos como la “paradoja EPR”. Existe la posibilidad de que dos partículas compartan sus propiedades como si fueran gemelas. Pero si, como defendía la corriente mayoritaria de la mecánica cuántica, la acción de un observador sobre una de ellas debía influir en la otra, esto implicaría que existía una comunicación instantánea entre ambas. Lo cual, argumentaban Einstein y sus colaboradores, rompía el irrompible límite de la velocidad de la luz. Estas influencias fantasmales a distancia como Einstein las denominó, son el fenómeno de entrelazamiento cuántico. En esta sección se pretende mostrar mediante una ejemplificación en qué consiste este fenómeno haciendo uso de una fuente de fotones entrelazados, cristales de calcita y detectores.



Algunos estados excitados de un átomo son tales que éste vuelve a su estado fundamental mediante dos saltos cuánticos en rápida sucesión. Las partículas entrelazadas, como en este caso, surgen cuando un electrón que desciende dos niveles energéticos dentro del átomo genera dos fotones en direcciones opuestas. Puesto que ninguna dirección en el espacio tiene preferencia, la polarización observada de los fotones será completamente aleatoria (Rosenblum & Kuttner, 2016). Los dos fotones que son liberados viajan en direcciones opuestas y siempre exhiben la misma polarización. Si, por ejemplo el fotón que sale por la derecha tiene un estado de polarización vertical, su compañero también estará polarizado verticalmente.

Es importante poner de manifiesto que si dos fotones llegan a polarizadores equidistantes justo al mismo tiempo, tienen que haber sido emitidos por el mismo átomo y, por lo tanto, están entrelazados. Pensemos en la siguiente analogía: Se considera que Alice y Bob son dos jóvenes que pretenden observar el comportamiento de los fotones. Entre Alice, a la izquierda y, Bob a la derecha hay una fuente de fotones en estados entrelazados (ver figura arriba). Cada uno de ellos observa la polarización de los fotones entrelazados con el eje de sus polarizadores orientados en el mismo ángulo. Los detectores de fotones están situados en las trayectorias 1 y 2 y serán los encargados de registrar la llegada de un fotón polarizado paralelo o perpendicular al eje de su cristal de calcita (Rosenblum & Kuttner, 2016).

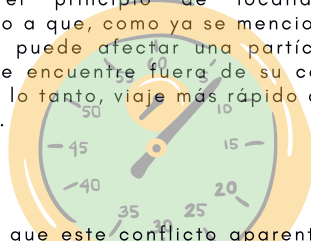
Cada vez que Alice observa que D1 ha registrado un fotón, Bob siempre observa que su compañero sigue la trayectoria 1 y cada vez que Alice observa que D2 ha registrado un fotón, Bob observa que su compañero sigue la trayectoria 2. Puesto que los fotones están entrelazados ¿por qué parece extraño que tengan la misma polarización? ¿será que la polarización de los fotones fue creada de esa manera?

Los experimentos demuestran que desde el punto de vista del observador en el laboratorio, en el preciso instante que se mide un fotón, el otro fotón adopta inmediatamente la misma propiedad de polarización. Si alguna influencia estuviera viajando desde el fotón que se mueve hacia la izquierda al fotón que se mueve hacia la derecha, para avisarle que se había determinado la polarización del fotón izquierdo mediante una medida, esta tendría que viajar entre ambos fotones instantáneamente, lo que ocasionaría un conflicto con la velocidad límite establecida por la relatividad especial.

En este sentido, si la mecánica cuántica muestra que las partículas adquieren esta o aquella propiedad cuando son medidas, entonces se debe aprender que la aleatoriedad puede tener vínculos a través del espacio. Pares de partículas entrelazadas no adquieren sus propiedades medidas de forma independiente. Son como un par de dados, por ejemplo, uno es lanzado en Bogotá y el otro en Medellín, cada uno de los cuales aleatoriamente da un número u otro, pero de tal forma que los dos números siempre coinciden. Las partículas entrelazadas actúan de forma similar y no lo hacen mágicamente, las partículas entrelazadas, incluso si están espacialmente separadas, nunca actúan de forma autónoma. Ahora bien, según la relatividad especial, este fenómeno es no-local ya que implica que una de las partículas se encuentra fuera del cono de luz de la otra dando lugar a interacciones que al parecer viajan a una velocidad mayor a la velocidad de la luz.

Cualquier otro sitio, que no es una parte integrante de los conos de luz, es la región del espacio-tiempo que queda fuera de los conos de un evento dado (un punto en el espacio-tiempo). Los eventos que están en cualquier otra parte, alejados unos de otros, son mutuamente inobservables, y no pueden ser conectados causalmente. Es por esta razón que Einstein, Podolsky y Rosen plantean el entrelazamiento como un argumento para mostrar que la mecánica cuántica es una teoría incompleta. Einstein aseguraba que este fenómeno predicho por la mecánica cuántica es inconsistente con el principio de localidad, debido a que, como ya se mencionó, no se puede afectar una partícula que se encuentre fuera de su cono y, por lo tanto, viaje más rápido que la luz.

El consenso entre la comunidad de físicos es que este conflicto aparente con la relatividad especial es ilusorio. La razón intuitiva es incluso: si los dos fotones están espacialmente separados, su origen común establece un vínculo fundamental entre ellos. Aunque se alejan uno de otro y se hacen espacialmente separados, siguen formando parte de un sistema físico. De modo que no se trata realmente de que una medida sobre un fotón "obligue" a otro fotón distante a adoptar propiedades de polarización idénticas. Más bien, los dos fotones están tan íntimamente ligados que está justificado considerarlos, incluso si están espacialmente separados, como partes de una entidad física (Greene, 2004).



Entonces se puede decir que una medida sobre esta única entidad "una entidad que contiene dos fotones" afecta a la entidad entera, es decir, afecta a ambos fotones a la vez. Es así como el argumento de EPR nos obliga a introducir un nuevo concepto: la no separabilidad. Las partículas no pueden siempre describirse como entidades completamente independientes, sino que a veces considerarse como elementos de un todo. La idea anterior aunque sea más intuitiva, es en algunas ocasiones vaga. Un argumento más preciso podría ser el siguiente: Cuando la relatividad especial dice que nada puede viajar más rápido que la velocidad de la luz, el "nada" se refiere a la materia o la energía. Pero lo que tenemos ahora es más sutil, porque en el fenómeno de entrelazamiento, no parece que ninguna materia o energía esté viajando entre los dos fotones, y por ello no hay nada cuya velocidad se tenga que medir. No obstante, hay una forma de saber si se ha tenido conflicto con la relatividad especial

Una característica común de la materia y la energía es que cuando viajan de un lugar a otro pueden transmitir información. Por ejemplo, los fotones que viajan por la fibra óptica hasta los computadores en las casas llevan información. Así, en cualquier situación donde se supone que algo, incluso algo no identificado, ha viajado más rápido que la velocidad de la luz se hace necesario realizar un test sencillo. Este test consiste en preguntar si se ha transmitido información o no (Greene, 2004). Si la respuesta es no, sigue vigente el razonamiento mencionado anteriormente, entonces nada ha superado la velocidad de la luz, y la relatividad especial no se cuestiona. En la práctica, esta es la prueba que suelen hacer los físicos para determinar si algún proceso de la naturaleza ha violado las leyes de la relatividad especial.

Ahora bien, no hay forma de enviar información de un fotón al otro porque el resultado encontrado en cualquiera de los detectores es simplemente una secuencia aleatoria de resultados, ya sea polarización-vertical o polarización-horizontal, puesto que en cualquier medición dada, existe la misma probabilidad de que el fotón se encuentre en un estado. De ninguna manera se puede controlar o predecir el resultado de cualquier medida concreta.

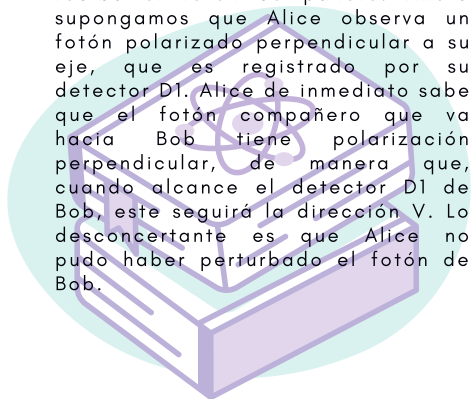
Bajo este contexto, el argumento estándar de la mecánica cuántica afirma que aunque medir la polarización de un fotón parece instantáneamente afectar al otro, ninguno se transmite información de uno a otro y la velocidad límite de la velocidad especial sigue en vigencia. En general, tampoco hay transmisión de energía porque esta permanece invariante en cada partícula. Lo único que podría alterar la energía total sería la interacción gravitacional, electromagnética o nuclear de alguna de esas partículas con una tercera. Pero en ese caso ya no nos encontraríamos ante una correlación a distancia sino ante una de las interacciones ya bien conocidas por la física (Aleman, 2011). La mecánica cuántica afirma que los resultados de la polarización están entrelazados, pero no están en una relación causa-efecto convencional porque no hay nada que viaje entre los dos lugares distantes.

DEBATE EINSTEIN-BOHR Y LA PARADOJA EPR

En su célebre artículo, EPR afirmaba que para que una teoría fuera completa tenía que haber una correspondencia uno a uno entre un elemento de la teoría y un elemento de la realidad. Una condición suficiente para la realidad de una cantidad física, como el impulso, por ejemplo, es la posibilidad de predecirlo con certeza sin perturbar el sistema. Si existía un elemento de la realidad física que la teoría no tenía en cuenta, entonces la teoría estaba incompleta. La situación sería similar a la de una persona que encuentra un libro en una biblioteca y cuando trata de verificarlo, el bibliotecario le dice que, según el catálogo, no hay registros de que la biblioteca tenga el libro. Con el libro en sus manos y observando los sellos que indican que efectivamente era parte de la colección, la única explicación posible a esta situación sería que el catálogo de la biblioteca estaba incompleto.

Ahora bien, si EPR lograba encontrar una propiedad física real antes de ser observada, entonces podían celebrar que habían demostrado la no completitud de la mecánica cuántica. Esa propiedad que estarían buscando es la polarización particular de uno de los miembros de un par de fotones entrelazados. Retomemos la ejemplificación de Alice y Bob con sus cristales de calcita y sus detectores de fotones. Esta vez Alice está un poco más cerca de la fuente de fotones entrelazados que Bob, por lo que recibe su fotón antes de que Bob reciba el fotón compañero. Ahora supongamos que Alice observa un fotón polarizado perpendicular a su eje, que es registrado por su detector D1. Alice de inmediato sabe que el fotón compañero que va hacia Bob tiene polarización perpendicular, de manera que, cuando alcance el detector D1 de Bob, este seguirá la dirección V. Lo desconcertante es que Alice no pudo haber perturbado el fotón de Bob.

Este salió de la fuente de fotones y se alejó a la velocidad de la luz, puesto que nada puede ir más rápido que la velocidad de la luz, nada que Alice pueda enviar tras el fotón de Bob puede atraparlo. Cuando Alice observe su fotón, el de Bob aún no había llegado a él, por lo que Bob tampoco podría haberlo perturbado (Rosenblum & Kuttner, 2016). Ahora bien, ni Alice ni Bob ni nadie han observado la polarización del fotón de Bob. Pero dicha polarización inobservada puede conocerse con certeza. Entonces podemos decir que por el momento, ¡EPR cumplió su cometido! El hecho de que Alice conozca con certeza la polarización del fotón de Bob "sin haberlo perturbado de ninguna manera" cumple el criterio de EPR para que la polarización del fotón de Bob sea una realidad física. Esto quiere decir que la mecánica cuántica, no está incluyendo esta realidad física y, por lo tanto, la conclusión del argumento EPR es que la teoría cuántica es incompleta



Cuando Bohr leyó el artículo de EPR, casi una década después de que se promulgara la interpretación de Copenhague, todavía no era plenamente consciente de las implicaciones de la teoría cuántica, en particular la que objetaba Einstein y sus colaboradores: que la observación no puede afectar instantáneamente a un sistema físico remoto. Bohr trabajó sin descanso durante varias semanas para darle respuesta a EPR, construyó un nuevo artículo con el mismo nombre en donde defendería nuevamente la teoría. Bohr no cuestiona la lógica del argumento EPR, lo que rechaza es su punto de partida, la condición para que algo sea una realidad física debido a que asumen la misma separabilidad que se observa en la física clásica. Esto es, si dos partículas no se ejercen ninguna fuerza física, lo que le ocurre a uno no puede de ninguna manera perturbar al otro. En la ejemplificación de fotones entrelazados, la observación que realiza Alice de su fotón no puede ejercer ninguna fuerza física sobre el fotón de Bob y, por lo tanto, según EPR, Alice no puede afectarlo.

Bohr estaba de acuerdo con que Alice no puede afectar de ninguna forma el fotón de Bob. Pero sostenía que, incluso sin una perturbación física, la observación de Alice ejerce una influencia instantánea sobre el fotón de Bob. Y según Bohr, esto constituye una perturbación que incumple con la condición de realidad de EPR (Rosenblum & Kuttner, 2016). Por ejemplo, solo después de que Alice observará que su fotón tenía una polarización horizontal, el fotón de Bob también adquiriría una polarización horizontal. Bohr en su intento por seguir defendiendo la mecánica cuántica, argumenta de manera muy filosófica que a pesar de que esta correlación es inexplicable, la meta de la física y de la ciencia en general, no debería ser describir la naturaleza, sino solo describir lo que podemos decir de la naturaleza. Sin embargo, Einstein rechazó su respuesta.

Einstein insistía en que el mundo que nos rodea es completamente real y la ciencia debía intentar explicarlo. Aludiendo a este caso, afirmaba que si un fotón mostraba una polarización particular, no se debía al acto de observación, sino a que el fotón ya poseía una propiedad física que determinaba esa polarización. Y si esa propiedad no se encontraba contemplada en la teoría, entonces la mecánica cuántica era una teoría incompleta.

Einstein insistía en que el mundo que nos rodea es completamente real y la ciencia debía intentar explicarlo. Aludiendo a este caso, afirmaba que si un fotón mostraba una polarización particular, no se debía al acto de observación, sino a que el fotón ya poseía una propiedad física que determinaba esa polarización. Y si esa propiedad no se encontraba contemplada en la teoría, entonces la mecánica cuántica era una teoría incompleta.

Finalmente, pese a los argumentos formulados por EPR, los experimentos realizados desde entonces han demostrado que la "acción fantasmal a distancia" existe realmente, con lo que el argumento de Einstein, una vez más, no puede derrotar a la mecánica cuántica. Aunque aún hay diferencias en la interpretación de la teoría, la opinión prevalente es que, efectivamente, la realidad no es local ni absoluta. Por supuesto, es posible que teorías del futuro expliquen por qué es de esa forma y que, al final, Einstein tenga razón y haya factores que aún no se están teniendo en cuenta, pero por ahora todo apunta a que Bohr tenía la razón. Su enfoque hacia la interpretación de la mecánica cuántica no es ontológico sino puramente epistemológico.

PROPUESTA EXPERIMENTAL A PROPÓSITO DEL CASO EPR

Si la actividad experimental busca ser una alternativa para la construcción de conocimiento, es pertinente preguntarse: ¿Qué fenómeno conviene presentar al estudiante? (Bautista, 1990, pág. 12) menciona que “para seleccionar los fenómenos presentados en el aula, se debe pensar en aquéllos que sean fundamentales de acuerdo con el desarrollo que se esté dando a una teoría. Es decir, los fenómenos cuyo tratamiento sea importante para evidenciar la necesidad de un cambio de concepción o construcción de una nueva teoría e imagen del mundo. Si se logra que el estudiante los interprete y vea la necesidad de una nueva teoría, se habrá logrado un avance significativo”. Es por esta razón que la actividad experimental cambia radicalmente su función de elemento comprobatorio a elemento de reflexión para la construcción del conocimiento.

Resulta conveniente presentar los fenómenos de la mecánica cuántica a los estudiantes ya que los obliga a reformular explicaciones y conceptos que están muy arraigados en la experiencia cotidiana. La conceptualización o formalización de un sistema cuántico requiere ingresar en un nuevo dominio explicativo y aceptar que existe una forma distinta de ver la naturaleza física que desafía a la actual que hemos construido con la experiencia macroscópica.

METODOLOGÍA

Para la guía de trabajo se propone una perspectiva fenomenológica en donde la actividad experimental tiene un enfoque cualitativo y un papel de vital importancia en la apropiación de conceptos. Bajo esta perspectiva, la actividad experimental es comprendida como el espacio que le permite a los estudiantes hacer diferentes interpretaciones alrededor del fenómeno para explicarlo. El estudiante formaliza una noción cuando construye un conjunto de palabras que caracterizan aspectos o cualidades de los efectos observados. Estas actividades pueden ser una alternativa de aprendizaje para que los estudiantes logren la ampliación de su experiencia y la formalización de fenomenologías, en este caso particular, la construcción de explicaciones que nos lleven a la noción de entrelazamiento cuántico.

Adicional a esto, desde el enfoque cualitativo (Ramirez, Martinez, & Fernandez, 2010, pág. 16) mencionan que “entre las características más notables se encuentran las de considerar: la realidad como múltiple, construida y holística de carácter dinámico, por lo que, no sería posible determinar verdades únicas, predecir y controlar los hechos como en la investigación convencional cuantitativa. El objetivo se dirige a la comprensión de los fenómenos y el significado que tiene para los sujetos que intervienen en el proceso educativo”. Aquí, es importante que las interpretaciones procedan de los estudiantes y no de los docentes o investigadores porque el propósito es que ellos construyan explicaciones que les ayude a conceptualizar su experiencia.

Por otra parte, se clarifica, además, que en las actividades experimentales se propende por el abandono del proceder clásico de conocer, lo cual es una oportunidad para configurar una nueva forma de ver la realidad física fundamentada en un conocer cuántico, por lo tanto, la explicación del fenómeno exige desligarse por completo de las ideas clásicas y construir una nueva explicación en torno a un pensamiento cuántico, es decir, que los estudiantes puedan hablar de un nuevo esquema de la física que es totalmente diferente a la física clásica.

ELEMENTOS PARA LA REALIZAR LAS ACTIVIDADES EXPERIMENTALES

- LÁSER VIOLETA 405 NM: FUENTE DE LUZ DE LA ACTIVIDAD EXPERIMENTAL



- PLACAS DE LAMBDA MEDIOS: ROTA LA POLARIZACIÓN TANTO COMO SE DESEE



- CRISTAL DE BORATO DE BARIO: FUENTE DE FOTONES ENTRELAZADOS EN POLARIZACIÓN



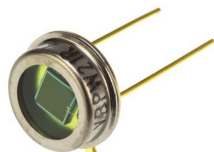
- ESPEJOS: DESVIAR LA TRAYECTORIA DE LOS HACES



- DIVISOR DE HAZ POLARIZADOR: POLARIZAR LA LUZ EN P. VERTICAL Y P. HORIZONTAL



- FOTODIODOS DE AVALANCHA: DETECTORES DE LUZ



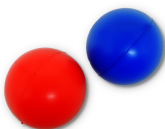
- TARJETA ARDUINO: ENCARGADA DE ENVIAR SEÑALES A LA INTERFAZ EN EL COMPUTADOR



- EMBUDOS: REPRESENTACIÓN CONOS DE LUZ



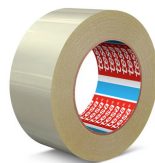
- PELOTAS: REPRESENTACIÓN DE LOS EVENTOS



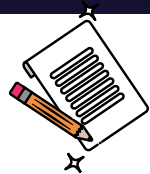
- PINTURA



- CINTA ADHESIVA



ACTIVIDAD EXPERIMENTAL 1: LOCALIDAD



OBJETIVO: CONSTRUIR LA NOCIÓN DE LOCALIDAD

DURACIÓN: 1 HORA

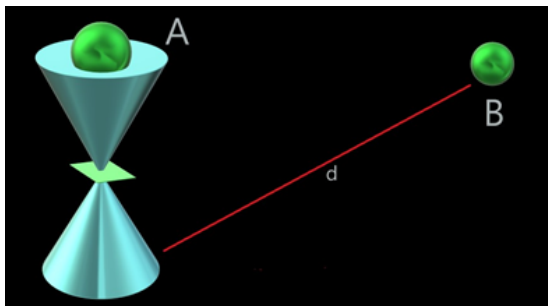
MATERIALES: DOS EMBUDOS DE PLÁSTICO DEL MISMO TAMAÑO, DOS PELotas, CINTA ADHESIVA Y PINTURA

Antes de iniciar, responde la siguiente pregunta: De acuerdo con tus ideas previas ¿qué comprendes por localidad?

PROCEDIMIENTO:

El objetivo de esta actividad experimental se enfoca en mostrar a qué se refería Einstein en su artículo de EPR cuando hablaba del principio de localidad. Con la actividad se busca que los estudiantes construyan explicaciones en relación con la localidad y el segundo postulado de la relatividad especial dado que fue uno de los argumentos de Einstein para decir que la mecánica cuántica era incompleta.

- El diseño de la actividad experimental que se plantea se constituye de dos embudos de plástico del mismo tamaño, dos pelotas, cinta adhesiva y pintura. Para el primer momento, se cubrirá con cinta adhesiva la abertura pequeña inferior de cada uno de los embudos, de tal forma que cuando se ponga la pintura dentro del embudo, esta no se derrame. La disposición de los materiales se muestra en la figura.



Es importante poner de manifiesto que la disposición de los embudos mencionada anteriormente se realiza con el propósito de construir una representación del espacio-tiempo de la geometría de Minkowsky para ilustrar el argumento del principio de localidad desde la teoría relativista. Los embudos serán el análogo a los conos de luz. El embudo superior representará el futuro, el inferior el pasado y la unión de los dos, el presente.

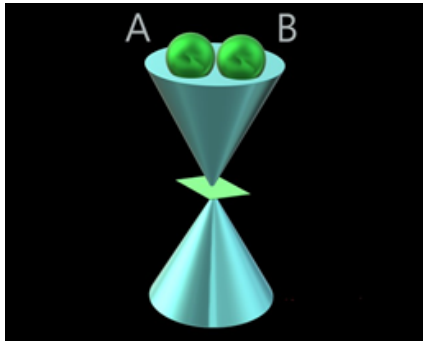
Una vez dispuestos los embudos en forma de "cono de luz", se pondrá una cantidad considerable de pintura dentro del cono futuro (embudo superior). Adicionalmente, una pelota A se ubicará en el interior del cono junto con la pintura. Una segunda pelota B, se ubicará a una distancia significativa de nuestro cono de luz (si se dispone del salón de clase, ubicar los embudos en un extremo y la pelota B en el otro).

ANALIZA...



Ahora bien, luego del anterior procedimiento, responde la siguiente pregunta: ¿Qué sucede con las pelotas A y B, son afectadas por la pintura? ¿Por qué?

- Para el segundo momento, se tomará la pelota B que se encontraba distanciada del cono de luz y se ubicará junto con la pelota A en el cono futuro (embudo superior). La disposición de los materiales se realiza como se observa en la figura.



Luego del segundo procedimiento, responde la siguiente pregunta: ¿Qué sucede con las pelotas A y B, son afectadas por la pintura? ¿Por qué?

ANALICEMOS DE NUEVO...

- ¿En qué momento las pelotas A y B fueron afectadas al mismo tiempo por la pintura y cómo relacionas esa situación con la localidad de Einstein?
- ¿Desde la localidad de Einstein, si la pelota B está dentro del cono que contiene a la pelota A, puede haber una interacción entre ellas? ¿Por qué?
- ¿Si hubiera una interacción entre la pelota B, que está fuera del cono de luz de la pelota A, se estaría violando el límite de la velocidad de la luz? ¿Por qué?
- ¿Que significa que en el sistema haya una conexión causal?
- ¿Cómo defines que un sistema sea local y no-local desde la relatividad?

ACTIVIDAD EXPERIMENTAL 2: ESTADOS ENTRELAZADOS

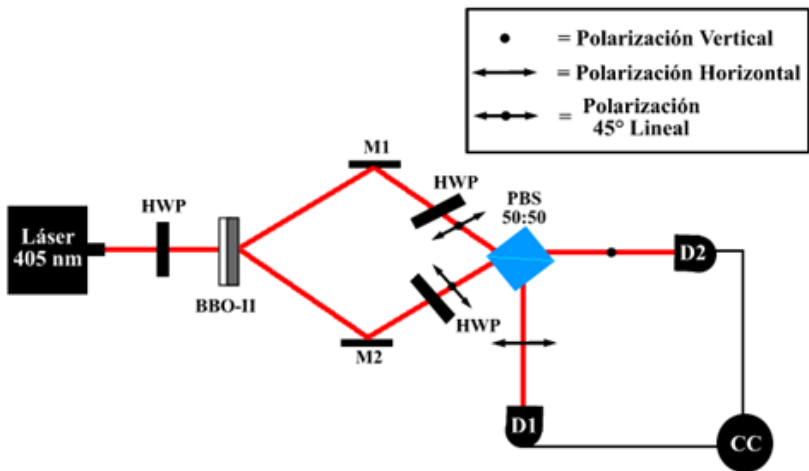
OBJETIVO: CONSTRUCCIÓN DE LA NOCIÓN DE ENTRELAZAMIENTO CUÁNTICO

DURACIÓN: 4 HORAS

MATERIALES: UN LÁSER VIOLETA DE 405NM, UN CRISTAL BBO TIPO II NO LINEAL (CRISTAL DE BETA BORATO DE BARIO), TRES PLACAS DE MEDIA ONDA, DOS ESPEJOS, UN DIVISOR DE HAZ POLARIZADOR, DOS FOTODIODOS DE AVALANCHA, UNA TARJETA ARDUINO Y UN COMPUTADOR CON CONEXIÓN A INTERNET.

Antes de iniciar, responde la siguiente pregunta: De acuerdo con tus ideas previas ¿qué comprendes por entrelazamiento cuántico?

Esta actividad experimental tiene como propósito que los estudiantes relacionen, comprendan y construyan explicaciones en torno a los efectos que se observan en el entrelazamiento en polarización de dos fotones y su relación con el principio de localidad. El diseño que se plantea para esta actividad se constituye de un láser violeta ($\lambda=405\text{nm}$), un cristal BBO tipo II no lineal (cristal de beta borato de bario), tres placas lambda medios ($\lambda/2$), dos espejos, un divisor de haz polarizador y dos fotodiodos de avalancha. La identificación de las componentes para la actividad experimental están consignados en la tabla y la disposición de estos se realiza como se observa en la figura



Abreviación y nombre en inglés	Nombre de la componente en español
Violet Laser ($\lambda=405\text{nm}$)	Laser violeta con longitud de onda 405nm
Half-Wave Plate (HWP)	Placa lambda medios o placa de media onda
Crystal Beta Barium Borate (BBO-II)	Cristal de borato de bario tipo II no lineal
Mirrors (M1; M2)	Espejos
Polarizing Beam Splitter (PBS)	Divisor de haz polarizador
Avalanche Photodiodes (D1; D2)	Fotodiodos de avalancha

PROCEDIMIENTO:



Antes de iniciar el procedimiento, responde las siguientes preguntas:

- ¿Qué es el eje óptico de un cristal?

- ¿Qué significa que el cristal BBO sea birrefringente y no-lineal?

A modo de descripción general, en esta actividad experimental se utiliza como fuente inicial de fotones un láser violeta con una longitud de onda de 405nm. Este incide en una placa de lambda medios (HWP) o lámina de media onda. La placa se ubicará lo más próxima posible a la salida del láser y rotará la polarización de este tanto como se desee de tal manera que será la encargada de obtener el estado de polarización necesario para que coincida con el eje óptico del cristal BBO-II y se obtenga la máxima generación de fotones.

Posteriormente este haz de luz (bombeo inicial) incide en el cristal de borato de bario (BBO-II) en donde mediante un proceso llamado conversión paramétrica espontánea descendente (SPDC) se emitirán dos nuevos haces correspondientes a los fotones llamados "Signal" y "Idler". Estos nuevos fotones serán infrarrojos ya que tendrán una longitud de onda de 810 nm. Este un proceso paramétrico, por lo tanto, la energía incidente se transfiere totalmente a los fotones generados, esto quiere decir que la suma de las energías de cada uno de los fotones es igual a la del bombeo inicial de acuerdo con la ley de conservación de la energía

Cuando se mide la polarización de los dos fotones emitidos espontáneamente del cristal BBO-II se encuentra que estos, convencionalmente, tienen una polarización perpendicular entre ellos, esto es, si se realiza una medición y uno tiene polarización vertical, su compañero debe tener polarización horizontal, esto quiere decir que uno de los fotones generados habrá de tener la misma polarización que los fotones del bombeo inicial antes de incidir en el cristal. Ahora bien, el fotón que sale "hacia arriba" incidirá en el espejo M1 y el fotón que sale "hacia abajo" incidirá en el espejo M2, esto se hace con el propósito de modificar la trayectoria de los fotones para que incidan en el divisor de haz polarizador (PBS).

Estos espejos estarán ubicados a 35 cm y 5° grados sobre la horizontal aproximadamente. Antes de que los fotones lleguen al PBS, cada haz se encontrará nuevamente con una placa lambda medios (HWP) que hará que su polarización rote 45° grados con respecto a la polarización que originalmente tenían, esto quiere decir que estarán en una superposición de los estados de polarización vertical y horizontal.

Al llegar al PBS (ubicado a otros 35cm sobre la horizontal), como los fotones están en superposición, lo que hará este dispositivo es dividir el haz que entra por cada uno de sus canales en dos de tal forma que la mitad de la luz es transmitida y la otra reflejada. A la salida del PBS, precisamente como se ha borrado la superposición, saldrá un fotón polarizado horizontalmente hacia el detector D1 y uno polarizado verticalmente hacia el detector D2.

Por último, los detectores son fotodiodos de avalancha que serán los encargados de detectar los fotones. A medida que inciden fotones en el fotodiodo, se van generando saltos de electrones lo que produce, como su nombre lo indica, una avalancha de electrones. Recordemos que los electrones en movimiento producen una corriente, en el caso de este dispositivo, se genera una fotocorriente que a su vez produce pulsos que posteriormente son enviados a la interfaz (se recomienda LabVIEW) como una coincidencia o fotoconteo.

Los fotodiodos de avalancha se deben conectar a tarjetas de desarrollo Arduino o circuitos de coincidencias, para que cuenten pulsos de fotocorrientes mediante una programación para esa función. Esto consiste en considerar como un fotoconteo el registro simultáneo de los fotones que llegan tanto a D1 como a D2. En la interfaz o laboratorio virtual en el computador, se establece una ventana temporal para considerar dicho evento como simultáneo, este tiempo puede ser, por ejemplo, de 100ns, esto es, si dentro de dicho intervalo de tiempo, tanto un fotón "Signal" como uno "Idler" son registrados, entonces se tiene un fotoconteo. Si llegan 200 fotones en ese tiempo, por ejemplo, entonces 100 debieron provenir de D1 y 100 de D2.

Si los detectores tienen el mismo número de conteos entonces los elementos ópticos en la actividad experimental están alineados correctamente. Toda esa información es conducida por un cable USB desde el circuito de los fotodiodos con la tarjeta arduino hasta el computador. Como se mencionó anteriormente, a la interfaz electrónica se le debe programar una ventana temporal para que adquiera datos del detector D1 y D2. LabVIEW es un laboratorio virtual en el que se permite crear interfaces de usuario y control de datos, este programa no necesita código ya que se usa mediante programación visual. También se pueden crear interfaces para el control y análisis de este tipo de datos en programas como Matlab y Python.

PARA TENER EN CUENTA:

- Adicionalmente, si se quisiera obtener el mismo estado de polarización tanto en el detector D1 como en el detector D2 (como en el ejemplo de Alice y Bob), se debe hacer una modificación previa en la polarización de uno de los fotones generados espontáneamente en el BBO-II. Esa modificación consiste en ubicar una placa de lambda medios (HWP) en su camino, con el propósito de rotar la polarización de cualquiera de los fotones tanto como se desee. En este caso, la placa puede rotar la polarización 90° de tal forma que si se quiere, por ejemplo, que la polarización de los dos fotones sea vertical, entonces el fotón que emerge con una polarización horizontal incidirá en la placa (HWP) para que esta rote su polarización y se pueda decir, finalmente, que los dos fotones mostrarán el mismo estado de polarización al momento de ser detectados
- Para realizar la conexión de los fotodiodos de avalancha con la tarjeta Arduino, el lector puede aplicar cualquier circuito convencional ya fabricado para ese propósito.

ANALICEMOS...

- ¿Cómo funciona la placa de lambda medios o media onda?

- ¿En qué consiste el proceso llamado conversión paramétrica espontánea descendente (SPDC)? ¿Qué tipo de SPDC es utilizado en la actividad experimental tipo I o tipo II?

- ¿Cuál es la polarización convencional de los fotones que se emiten en SPDC tipo II?

- ¿Cuál es la función del divisor de haz polarizador (PBS) en la actividad experimental?

- ¿Cuál es el funcionamiento de los fotodiodos de avalancha? ¿Estos dispositivos reconocen la polarización de los fotones?

- ¿Cuál interface de programación se usará?

- ¿Por qué se dice que el par de fotones entrelazados tienen una naturaleza no-separable?

- De acuerdo con tu opinión y las nociones adquiridas en la realización de la actividad experimental ¿Por qué crees que la medición de la polarización de un fotón influye en la polarización de su fotón gemelo? ¿Crees que su naturaleza es de esa forma?

- En la actividad experimental específicamente ¿Qué nos demuestra que los fotones están entrelazados? ¿Está relacionado con la ventana temporal de detección?

ACTIVIDAD FINAL: DISCUSIÓN GRUPAL

OBJETIVO: CONSOLIDAR LA CONSTRUCCIÓN DE LAS NOCIONES DE LOCALIDAD Y ENTRELAZAMIENTO

DURACIÓN: 2 HORAS



Lee las siguientes preguntas y socializa las posibles respuestas con los integrantes del grupo:

- ¿Qué se logró construir de cada uno de los conceptos que abordaron las actividades experimentales?

- ¿Consideras que la mecánica cuántica implica diferentes formas de conocer la realidad física?

- ¿El fenómeno de entrelazamiento cuántico viola el postulado del límite de la velocidad de la luz de la relatividad?

- ¿Consideras que la mecánica cuántica configura nuestra forma de pensamiento clásico?

- ¿Qué concluyes de las actividades experimentales que se realizaron?

REFERENCIAS

- Aleman, R. (2011). Relatividad Especial y Teoría Cuántica: ¿Son Realmente Compatibles? . *Thémata Revista de Filosofía* , 66-78.
- Bautista, G. (1990). ALGUNAS CONSIDERACIONES PARA LA ENSEÑANZA DEL ELECTROMAGNETISMO. *Revista Física y Cultura*. Universidad Pedagógica Nacional.
- Burbano, P. P. (2001). REFLEXIONES SOBRE LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA. *Universitas Scientiarum*, 55-59.
- Fanaro, M. D. (2009). "La Enseñanza de la Mecánica Cuántica en la Escuela Media" (Tesis Doctoral). Programa Internacional de Doctorado, Universidad de Burgos, 5.
- Greene, B. (2004). *The Fabric of the Cosmos: Space, Time, and the Texture of Reality*. United States: Alfred A. Knopf.
- Ramirez, N., Martinez, R., & Fernandez, N. (2010). DOS FORMAS DE ORIENTAR LA INVESTIGACIÓN EN LA EDUCACION DE POSTGRADO: LO CUANTITATIVO Y LO CUALITATIVO . *Revista Pedagogia Universitaria* , 13-28.
- Rosenblum, B., & Kuttner, F. (2016). *El Enigma Cuántico: El secreto mejor guardado de la física contemporánea*. Barcelona : Tusquets Editores S.A