

ACTIVIDADES EXPERIMENTALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE EXPLICACIONES
ALREDEDOR DE LOS FUNDAMENTOS BÁSICOS DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

Luz Angélica Walteros Rodríguez

Línea de Profundización: La enseñanza de la física y la relación física matemática

Grupo: Campos y Partículas

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

BOGOTÁ D. C.

2016

ACTIVIDADES EXPERIMENTALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE EXPLICACIONES
ALREDEDOR DE LOS FUNDAMENTOS BÁSICOS DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

Luz Angélica Walteros Rodríguez

Monografía presentada para obtener el título de Licenciada en Física

Asesor: Mauricio Rozo Clavijo

Línea de Profundización: La enseñanza de la física y la relación física matemática

Grupo: Campos y Partículas

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

BOGOTÁ D. C.

2016

RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN (RAE)

1. Información General	
Tipo de documento	Trabajo de Grado
Acceso al documento	Universidad Pedagógica Nacional. Biblioteca Central
Título del documento	ACTIVIDADES EXPERIMENTALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE EXPLICACIONES ALREDEDOR DE LOS FUNDAMENTOS BÁSICOS DE LA MECÁNICA CUÁNTICA
Autor(es)	Walteros Rodríguez ,Luz Angélica
Director	Mauricio Rozo Clavijo
Publicación	Bogotá, Universidad Pedagógica Nacional,2016.49 P.
Unidad Patrocinante	Universidad Pedagógica Nacional
Palabras Claves	ESTADO, PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN, ACTIVIDADES EXPERIMENTALES, FORMALIZACIÓN

2. Descripción
<p>En la enseñanza de la física moderna y en particular de la mecánica cuántica, en la mayoría de los casos, se limita por parte del docente al simple enunciado de los fenómenos por medio de experimentos y ecuaciones sin resaltar la manera como los conceptos y modelos explicativos surgen dentro de un contexto particular. Con la intención de mejorar la enseñanza-aprendizaje de la mecánica cuántica, se proponen una serie de actividades experimentales que permiten evidenciar el comportamiento de la luz, lo cual le permitirá 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.</p>

3. Fuentes
<ul style="list-style-type: none">• Ayala Manrique, M. M., Garzón Barrios, M., & Malagón Sánchez, J. F. (2008).

Consideraciones sobre la formalización y matematización de los fenómenos físicos. En M. M. Ayala Marique, Á. E. Romero Chacón, J. F. Malagón Sánchez, O. L. Rodríguez Rodríguez, Y. Aguilar Mosquera, & M. Garzón Barrios, *Los procesos de formalización y el papel de la experiencia en la construcción del conocimiento sobre los fenómenos físicos* (págs. 17-32). Bogotá D.C: Universidad de Antioquia y Universidad Pedagógica Nacional.

- Cala Vitery, F., & Eslava, E. (2011). *Mecánica cuántica :sobre su interpretación , historia y filosofía*. Bogotá: Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Dirac, P. (1967). El principio de superposición. En P. Dirac, *Principios de la mecánica cuántica* (A. Montes, Trad., págs. 15-18). Barcelona, España: Ariel.
- Eisberg, R., & Resnick, R. (2006). Física cuántica: ATOMOS, MOLÉCULAS, SÓLIDOS, NUCLEOS Y PARTICULAS. En R. Eisberg, & R. Resnick, *Física cuántica: ATOMOS, MOLÉCULAS, SÓLIDOS, NUCLEOS Y PARTICULAS* (págs. 62-63 y 393-395). México: LIMUSA, S.A.
- Fanaro, M. d. (Julio de 2009). La Enseñanza de la Mecánica Cuántica en la Escuela Media (Tesis de Doctorado) . Universidad de Burgos . Burgos .
- Ferreiros, J., & Ordoñez, J. (2002). Hacia una filosofía de la experimentación. *CRÍTICA, Revista Hispanoamericana de Filosofía* , 34 (102).
- Feynman, R., Leighton, R., & Sands, M. (1989). *Física* (Vol. III). México: Addison Wesley Iberoamericana.
- Goded Echevarria, F. (1965). *Mecánica cuántica*. Madrid : Drossat.
- Greca, I. A., & Herscovitz, V. E. (2002). Construyendo significados en mecánica cuántica:fundamentación y resultados de una propuesta innovadora para su introducción en el nivel universitario. *ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS* , 20 (2), 327-338.
- Hodson, D. (1994). Hacia un Enfoque mas critico del Trabajo de Laboratorio. *Enseñanza de las Ciencias* , 12 (3), 299-313.

- Malagón Sánchez, F., Sandoval Osorio, S., & Ayala Manrique, M. M. (2013). La actividad experimental: construcción de fenomenologías y procesos de formalización . *Praxis Filosófica Nueva serie* , 119-138.
- Messiah, A. (1965). *Mecánica cuántica* (Vol. I). (C. de Azcárate, & J. Tortella, Trans.) Madrid: Tecnos.
- Müller, R., & Wiesner, H. (2002). Teaching quantum mechanics on an introductory level. *American Journal of Physics* , 70 (3), 200-209.
- Peña, L. d. (2006). *Introducción a la mecánica cuántica* (Tercera edición ed.). México: Universidad Nacional Autónoma de México: Fondo de Cultura Económica .
- Solbes, J., & Sinarcas, V. (2010). Una propuesta para la enseñanza aprendizaje de la física cuántica basada en la investigación en didáctica de las ciencias. *Revista de Enseñanza de la Física* , 23 (1 y 2), 57-84.
- Solbes, J., Bernabeu, J., Navarro, J., & Vento, V. (1988). Dificultades en la enseñanza/aprendizaje de la Física Cuántica. *Revista Española de Física* , 2, 22-27.
- Spinel Gómez, M. C. (2009). *Introducción a la mecánica cuántica no relativista*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia .
- Stephens, A. L., & Clemente, J. J. (2012). The Role of Thought Experiments in Science and Science Learning. (B. J. Fraser, K. G. Tobin, & C. J. McRobbie, Edits.) *Second International Handbook of Science Education* , 1, 157-176.

4. Contenidos

Capítulo 1: El papel del experimento para la enseñanza de la física y en particular de la mecánica cuántica

Cuando hablamos de ciencia se hace referencia a dos elementos que la constituyen de relevancia elevada, las cuales son la teoría y la experimentación, que desde la filosofía de la ciencia popperiana y pospopperiana, se planteaba que la relación existente entre estas dos partes se debe a que el experimento es el resultado de la teoría, es decir, que este depende directamente de ella, pero con el paso del tiempo la ciencia moderna ha mostrado que el experimento tiene autonomía propia por lo cual este no está sujeto explícitamente a la teoría. Teniendo esto de presente en el capítulo se hace un abordaje en forma general al papel que ha tenido el experimento dentro de la ciencia, específicamente en la física. Finalmente se realiza una caracterización de cómo se concibe el experimento dentro de la enseñanza.

Capítulo 2: Sobre la noción de estado y el principio de superposición

En la mecánica cuántica existen ciertas bases las cuales permiten tener un primer acercamiento en relación a las temáticas que desde esta se manejan y a la forma en la que se abordan los fenómenos de estudio; entre estas encontramos la noción de estado y el principio de superposición que son el principal interés del trabajo.

En la búsqueda de como poder abordar estas dos ideas, en el capítulo se realiza un acercamiento a la noción de estado y el principio de superposición como lo trabaja Dirac, adicionalmente se hace uso del tipo de formalización que realiza Feynman entorno a los experimentos de Stern – Gerlach, desde los cuales realiza la explicación sobre la noción de estado y el principio de superposición. Finalmente se revisan experiencias en las cuales haciendo uso de materiales como los polarizadores se puede llegar a encontrar elementos desde las cuales se puede tener un acercamiento a las ideas en la cual se está interesada, lo cual implica que se hace un abordaje en relación a estados de polarización.

Capítulo 3: Sobre las actividades experimentales: configuraciones para evidenciar la noción de estado y el principio de superposición

Habiendo realizado la respectiva contextualización en los dos capítulos anteriores y buscando hacer más perceptible la noción de estado y el principio de superposición, se realiza el diseño de una serie de montajes, a partir de los cuales se pueden establecer relaciones desde las cuales se puede construir una explicación entorno a estas bases de la mecánica cuántica. Por tanto en este

capítulo, se realiza la descripción de los montajes junto con la formalización de los mismos basados en el tratamiento que hace Feynman de los aparatos de Stern-Gerlach. Adicionalmente se realiza la respectiva discriminación dividiendo en dos grupos los diferentes montajes diseñados con el fin de dar claridad a lo que se quiere percibir en cada uno de ellos, con miras a construir explicaciones entorno a la noción de estado y el principio de superposición.

5. Metodología

La elaboración del trabajo de investigación se abordaron siguientes fases:

- **Primera fase:** Revisión y Análisis de la bibliografía, con lo que se busca fortalecer las bases conceptuales en relación a la noción de estado y principio de superposición.
- **Segunda fase:** Diagramas simbólicos, los cuales permiten dar cuenta a partir de diferentes configuraciones de un mismo esquema, la noción de estado y principio de superposición de estados
- **Tercera fase:** Diseño y construcción de montajes experimentales, base para realizar las diferentes explicaciones alrededor de los fundamentos de la mecánica cuántica.
- **Cuarta fase:** Redacción del trabajo de grado, se vincula lo realizado en las tres primeras fases para configurar el marco teórico del proyecto de grado.
- **Quinta fase:** Elaboración de la cartilla y realización del artículo, resultados del trabajo de grado con los que se busca recopilar los aportes más significativos, adicionalmente busca mostrar todo el desarrollo que se realizó alrededor de la problemática planteada.

6. Conclusiones

- Es importante destacar que dentro del contexto de la ciencia la experimentación ha sido una de los aspectos que se encuentran de base, teniendo así un papel relevante en la construcción de teorías. Por lo tanto, es preciso considerar que dentro del contexto de la ciencia en este caso específicamente de la física las actividades experimentales así como la teoría deben considerarse que están al mismo nivel.

- Existen diversos tipos de actividades experimentales, entre las que encontramos la experimentación cualitativa y cuantitativa, se ha llegado a pensar que la primera de ellas al ser menos formal tiene menos importancia que la segunda, pero dentro del contexto de la ciencia se ha observado que en ocasiones las mediciones precisas no desempeñan un papel tan crucial en el momento de establecer nuevas leyes científicas o establecer teorías.
- La perspectiva fenomenológica utilizada permite que al momento de realizar una descripción de las actividades experimentales propuestas lo más importante a considerar sean los efectos que se perciben, los cuales son descritos desde la mecánica cuántica debido a que es el sujeto quien decide como interpretar lo que se le está presentando.
- La investigación que se realizó alrededor de los conceptos de estado y principio de superposición condujo a enfatizar la diferencia de su conceptualización alrededor de la mirada clásica y cuántica. Desde el contexto clásico la noción de estado queda caracterizada especificando los observables de posición y momento, mientras que el principio de superposición se toma como la combinación lineal de elementos con las mismas características donde el observador no perturba al sistema de manera apreciable. Por otro lado, desde el contexto cuántico el estado se define especificando el vector de estado y la superposición está ligada a la idea de que el observador al observar el sistema perturba de manera incontrolable dejando el sistema en un estado específico.
- Es posible diseñar actividades experimentales que permite un acercamiento a efectos desde los cuales se pueda hablar de la noción de estado y el principio de superposición de la mecánica cuántica usando elementos de fácil adquisición.
- Se logró extrapolar la simbología que desarrolló Feynman en relación al experimento de Stern-Gerlach, aportando una simbología que permite representar las actividades diseñadas desde las cuales se logran percibir ciertos efectos como es la descomposición de un haz en varios haces, desde los cuales se realiza la explicación entorno a la noción de estado y el principio de superposición desde el contexto de la mecánica cuántica.

- Cuando se quiere realizar la descripción de un fenómeno físico es preciso elaborar una formalización que permita dar cuenta del comportamiento del mismo. La formalización está estrechamente relacionada con la construcción de palabras, dibujos, simbología, proposiciones, entre otras, que permiten dar cuenta del sistema de estudio.

Elaborado por:	Luz Angélica Walteros Rodríguez
Revisado por:	Mauricio Roza Clavijo

Fecha de elaboración del Resumen:	25	11	2016
--	----	----	------

Tabla de Contenidos

Introducción.....	1
Objetivos.....	4
General.....	4
Específicos.....	4
Capítulo 1	
El papel del experimento para la enseñanza de la física y en particular de la mecánica cuántica.....	5
Capítulo 2	
Sobre la noción de estado y el principio de superposición.....	14
Necesidad de una nueva teoría.....	14
Noción de estado.....	15
Principio de superposición	16
Formalización del principio de superposición y la noción estado de un sistema cuántico.....	17
Principios básicos de la mecánica cuántica.....	30
Capítulo 3	
Sobre las actividades experimentales: configuraciones para evidenciar la noción de estado y el principio de superposición.....	32

Descripción de las actividades experimentales.....	33
...Formalización de los montajes considerando las representaciones de los aparatos de Stern - Gerlach.....	34
Conclusiones.....	40
Bibliografía.....	42
Apéndice.....	44
Transformaciones de base	44
Experimento de Stern- Gerlach.....	46

Lista de Figuras

Figura 1. Dos polarizadores con su eje de polarización en la dirección Y.....	20
Figura 2. Dos polarizadores: El primero con eje de polarización en la dirección Y, el segundo con su eje de polarización en la dirección X.....	21
Figura 3. Dos polarizadores con su eje de polarización en la dirección X.....	21
Figura 4. Representación matricial de las amplitudes de probabilidad y condición de ortonormalidad.....	23
Figura 5. Dos polarizadores con su eje de polarización rotado 45° respecto al plano de referencia ortogonal (X, Y).....	24
Figura 6. Dos polarizadores con su eje de polarización rotado 45° respecto al plano de referencia ortogonal (X, Y) contrarios a los de la figura 5.....	24
Figura 7. Polarizadores rotados 45° en dirección respecto al plano ortogonal (X, Y).....	25
Figura 8. Representación matricial de las amplitudes de probabilidad y condición de ortonormalidad que se obtiene cuando se han rotado los polarizadores	27
Figura 9. Dos polarizadores: El primero con su eje de polarización en la dirección Y el segundo rotado 45° respecto al plano ortogonal (X, Y).....	28
Figura 10. Disposición de los elementos para la actividad 1.....	33
Figura 11. Disposición de los elementos para la actividad II.....	34
Figura 12. Disposición de los elementos para la actividad 3	35
Figura 13. Esquema y representación de la actividad 1.....	35
Figura 14. Esquema y representación de la actividad 2.....	37
Figura 15. Arreglos para obtener estados puros o bien definidos	37
Figura 16. Esquema y representación de la actividad 3.....	38

Figura 17. Representación matricial de las amplitudes de probabilidad y condición de ortonormalidad.....	39
Figura 18. Rotación de un plano (X', Y') , habían muy pocas personas.....	44
Figura 19. Esquema del aparato de Stern –Gerlach	46

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia el hombre ha centrado su atención en configurar el mundo en el que vive, estructurando explicaciones a los hechos y cosas de la naturaleza que le resulten relevantes. En esta tarea, ha construido teorías dentro de un contexto determinado como la mecánica clásica, el electromagnetismo, la mecánica cuántica entre otras, supeditadas a su mirada particular y mediada por sus intereses, enfoques, inquietudes e interpretaciones.

Bajo este contexto, la indagación sobre que es la materia condujo a los pensadores del siglo XIX a la elaboración de experimentos cuyos resultados pusieron en evidencia que tanto la mecánica newtoniana como la teoría clásica de campos, hasta entonces formuladas, no daban respuesta satisfactoria de los datos empíricos obtenidos. Por lo cual, se tuvo la necesidad de abandonar las ideas clásicas por otras para dar cuenta de los datos empíricos hasta entonces obtenidos. La mecánica cuántica surge como respuesta a estas preguntas y muestra una nueva forma de mirar la naturaleza a nivel atómico; forma que está caracterizada por el hecho de que la observación que se realice sobre el sistema tiene un grado de perturbación incontrolable sobre éste (Dirac, 1967).

Por otro lado, en las últimas décadas se han realizado una serie de investigaciones sobre las dificultades que se presentan en relación con la enseñanza/aprendizaje de la mecánica cuántica. Entre las que se encuentra la investigación realizada por Solbes & Sinarcas (2010), en la cual se evidencia una serie de rutas para la enseñanza de diferentes tópicos en mecánica cuántica. Una de ellas, se enfoca en el componente axiomático, el cual genera dificultades en el estudiante en torno a la comprensión sobre el comportamiento de los sistemas objeto de estudio. Por otro lado, el enfoque histórico presenta una serie de inconvenientes debido a que se dan los desarrollos de la mecánica cuántica tal como se dieron desde sus orígenes dejando de lado los fundamentos propios y desarrollos ulteriores (Solbes & Sinarcas, 2010).

Adicionalmente, en la enseñanza de la física moderna y en particular de la mecánica cuántica, en la mayoría de los casos, se limita por parte del docente al simple enunciado de los fenómenos por medio de experimentos y ecuaciones sin resaltar la manera como los conceptos y modelos explicativos surgen dentro de un contexto particular (Fanaro, 2009). Esto conduce a los estudiantes a enfocar su conocimiento hacia la formalización de la teoría buscando aprender su

algoritmo y dejando de lado los fundamentos en los cuales se apoya. Además, los docentes son conscientes de las situaciones y problemas que surgen en el aula en relación con el aprendizaje de los estudiantes frente a tópicos abordados en mecánica cuántica. Uno de ellos radica en saber si las dificultades son consecuencia de la actitud y/o aptitud del estudiante o por el contrario, es causada por algunas formas inadecuadas de abordar los tópicos por parte del docente y más aún cuando éstos requieren algún tipo de análisis matemático.

Considerando las dificultades y la forma como se plantea la enseñanza de la mecánica cuántica y así mismo dada la importancia que tiene esta mirada (Müller & Wiesner, 2002), surge la necesidad de construir nuevas propuestas que permitan una mejor comprensión de los diferentes tópicos que esta aborda. En este sentido, se proponen actividades experimentales que permitan a los estudiantes reflexionar en torno al fenómeno mismo y adquieran un conocimiento con sentido y significado, ya que como lo señala Comenio (1976), el uso de modelos y representaciones es de gran conveniencia para la comprensión de las ciencias, y en este caso particular, las actividades experimentales dan elementos para la comprensión sobre los fundamentos de la mecánica cuántica. Este enfoque propone una postura diferente a la usualmente establecida, ya que a partir de las actividades experimentales se contribuye a generar una mayor interacción entre los conceptos vistos en el aula y las maneras de dar explicación al fenómeno alrededor de las actividades diseñadas.

Por lo tanto, el presente trabajo se desarrollará en tres capítulos los cuales se titulan:

- Capítulo 1: El papel del experimento para la enseñanza de la física y en particular de la mecánica cuántica
- Capítulo 2: Sobre la noción de estado y el principio de superposición.
- Capítulo 3: Sobre las actividades experimentales: configuraciones para evidenciar la noción de estado y el principio de superposición.

Inicialmente se comienza a hablar de ciencia para lo cual se hace referencia a dos elementos que la constituyen de relevancia elevada, las cuales son la teoría y la experimentación, que desde la filosofía de la ciencia popperiana y pospopperiana, se planteaba que la relación existente entre estas dos partes se debe a que el experimento es el resultado de la teoría, es decir que este depende directamente de ella, pero con el paso del tiempo la ciencia moderna ha

mostrado que el experimento tiene autonomía propia por lo cual este no está sujeto explícitamente a la teoría. Teniendo esto de presente en el capítulo 1, se hace un abordaje en forma general al papel que ha tenido el experimento dentro de la ciencia, específicamente en la física y en últimas se realiza una caracterización de cómo se va a percibir el experimento dentro de la enseñanza.

Habiendo abordado el papel del experimento y las actividades experimentales dentro de la ciencia, y debido a que el interés es abordar los fundamentos básicos de la mecánica cuántica, es preciso considerar que dentro de la mecánica cuántica existen ciertas bases, las cuales permiten tener un primer acercamiento en relación a las temáticas que desde esta se manejan y a la forma en la que se abordan los fenómenos de estudio.; entre estas encontramos la noción de estado y el principio de superposición, que son el principal interés del trabajo.

En la búsqueda de cómo poder abordar estas dos ideas, en el capítulo 2 se realiza un seguimiento al modo en que Feynman a partir de los experimentos de Stern – Gerlach, realiza la explicación sobre la noción de estado y el principio de superposición, mostrando paralelamente la formalización que va realizando entorno a los mismos. Finalmente se revisan experiencias en las cuales haciendo uso de materiales, como polarizadores se puede llegar a encontrar elementos desde los cuales se puede tener un acercamiento a las ideas en las cuales se está interesado, lo cual implica que se hace un abordaje entorno a que sucede cuando se trabaja con polarizadores

Finalmente, habiendo realizado la respectiva contextualización en los dos capítulos anteriores y buscando hacer más perceptible la noción de estado y el principio de superposición, se realiza el diseño de una serie de montajes, desde los cuales que se pueden establecer relaciones que permiten construir una explicación entorno a estas bases de la mecánica cuántica. Por tanto en este capítulo, se realiza la descripción de los montajes junto con la formalización de los mismos basados en el tratamiento que hace Feynman de los aparatos de Stern-Gerlach. Adicionalmente se realiza la respectiva discriminación dividiendo en dos grupos los diferentes montajes diseñados con el fin de dar claridad a lo que se quiere percibir en cada uno de ellos, con miras a construir explicaciones entorno a la noción de estado y el principio de superposición.

OBJETIVOS

Objetivo General

Construir explicaciones alrededor de un conjunto de actividades experimentales que permitan llegar a los fundamentos básicos de la mecánica cuántica.

Objetivos específicos

- Indagar en los artículos originales de Paul Dirac y Richard Feynman y/o textos relacionados sobre las bases en las que se apoya la mecánica cuántica.
- Diseñar las actividades experimentales alrededor del concepto de estado y principio de superposición.
- Proponer diagramas sobre las diferentes configuraciones alrededor de las actividades experimentales construidas para dar cuenta de la noción de estado y el principio de superposición.

CAPITULO I

EL PAPEL DEL EXPERIMENTO PARA LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA Y EN PARTICULAR DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

Cuando se habla de ciencia se hace referencia a dos elementos que la constituyen, la teoría y la experimentación que desde la filosofía de la ciencia popperiana y pospopperiana (Ferreiros & Ordoñez, 2002) se planteaba que la relación existente entre estas dos partes dependía de ver al experimento como el resultado de la teoría, es decir, que este se encuentra sujeto directamente a la teoría pero la ciencia moderna ha mostrado que el experimento tiene autonomía propia por lo cual este no está subordinado explícitamente a la teoría.

La nueva perspectiva en relación al experimento plantea que “en la actividad científica, la fase experimental y la fase teórica están situadas cuando menos en el mismo plano: que la primera goza de al menos tanta autonomía como pueda tener la segunda” (Ferreiros & Ordoñez, 2002, pág. 48)), es decir, no se debería privilegiar una por encima de la otra.

Aún así ha existido una tradición teoreticista desde la cual se han privilegiado los aspectos teóricos del conocimiento, desde este punto toda actividad científica se ha relacionado con la elaboración de teorías dejando en los límites lo empírico, lo cual término siendo invisibilizado. Esta preferencia por la teorización se vio fortalecida por diversas filosofías entre las cuales se encontraban: La filosofía crítica Kantiana, la filosofía de tradición empirista y la concepción popperiana.

Adicionalmente, los físicos del siglo XIX contribuyeron en convertir en tendencia al teoreticismo, alejando de sus discusiones el papel de la actividad experimental, lo cual les fue posibilitado, ya que por este entonces se desarrolló la física teórica, como una subdisciplina, la cual gozaba de autonomía propia dentro de la comunidad científica y como si fuera poco, los teóricos entran a tomar una importancia más elevada dentro de la misma comunidad de físicos. Los trabajos desarrollados ofrecían grandes sistemas axiomáticos, de tal manera que en el caso en el cual se buscara algo más intuitivo, no se acudía a lo experimental sino que se pensaba en cambiar el aparato matemático que se estaba utilizando. En ese contexto, la actividad más importante de los científicos era la elaboración de teorías.

Aunque el teoreticismo logra tomar fuerza, se percibe ciertos limitantes por parte de este, ya que limita el accionar científico a una mera construcción conceptual. Y es que la ciencia no solo es constituida por elaboraciones teóricas, esta es una combinación entre filosofía y técnica entendiendo la filosofía como aquella que nos aproxima a lo natural mientras la técnica hace alusión a lo fabricado, en ese sentido al considerar la ciencia como una actividad teórica estaría cerca de la filosofía, pero si está vinculada mas con lo empírico, sería más cercana a la técnica.

Se hace necesario considerar que la ciencia está en medio de las dos partes, de modo que puede transitar de la filosofía a la técnica o viceversa, nutriéndose así de ambos aspectos. Por otro lado, es perceptible como el teoreticismo falla al considerar que se puede atribuir una teoría a todo, de modo que lo perceptible sea teorizado, que se pueda formular de manera abstracta cualquier planteamiento, lo cual se ha visto como una tendencia dentro del desarrollo de la física.

Aun así, se sugiere el poder transitar entre lo teórico y lo experimental de modo que cualquier tipo de problema, situación o proceso se le realice una formalización abstracta y teórica pero paralelamente poder realizar una interpretación en términos experimentales e instrumentales.

El teoreticismo trae consigo el determinar la pareja teoría-observación que se convierte en la base fundamental del análisis. No es secreto que aspectos teóricos tengan una relación con aspectos de la observación por lo cual, según lo plantea Ferreiros & Ordoñez (2002) “las elaboraciones teóricas que construyen el núcleo de la ciencia se juzgarían ya sea inductiva o deductivamente a la luz de las observaciones”. Específicamente, cuando nos referimos a la ciencia contemporánea, se evidencia que esta carece de sentido, si se deja de lado su parte experimental, para ser más precisos, la física se ha constituido a partir de resultados experimentales, lo cual resalta que es preciso experimentar para la construcción de las diversas teorías.

En este sentido, se resalta la fenomenotécnica como pilar de las ciencias físicas, ya que se evidencia, que los aspectos empíricos se conseguían a partir de situaciones fabricadas. Lo anterior se ve reflejado en el hecho de que “la historia inicial de muchas ramas de la física no fue tanto un asunto de teoría como del control de técnicas experimentales relativas a la fabricación y utilización de instrumentos” (Ferreiros & Ordoñez, 2002, pág. 60). Puntualmente, la ciencia del siglo XIX, fue afectada por diversas fenomenotécnicas evidenciándose cómo lo tecnológico entra a convertirse en uno de los pilares del trabajo científico alejándose así un poco de lo natural.

Entrando en la discusión de la experimentación, se puede hacer mención de la clase de experimentos que se pueden llegar a manejar. En el siglo XVIII, se realiza una clasificación a manos de los comerciantes de instrumentos científicos, los cuales establecen tres tipos:

- Matemáticos: Posibilitan realizar mediciones cuantitativas.
- Ópticos: Específicamente para óptica.
- Filosóficos: Usados frente a fenómenos innovadores que implicaban efectos nuevos (Inicialmente no permitían la realización de mediciones)

Dentro del contexto de la ciencia moderna y contemporánea se establece que no existe algo propio en el diseño de un instrumento que lo identifique propiamente como matemático o filosófico, considerando esta perspectiva la distinción a realizar debe ser entre experimentos y no entre los instrumentos que se emplean.

A partir de lo anterior se sugiere distinguir entre experimentos cualitativos y cuantitativos, lo cual permite traer a discusión el hecho que en ese entonces el método científico sugería que el comienzo para elaborar una teoría científica era con mediciones, lo cual dejaba de lado la experimentación cualitativa. Pero se observa que “pocas veces las mediciones precisas desempeñan un papel crucial en el descubrimiento de leyes científicas o incluso en la contrastación de teorías” (Ferreiros & Ordoñez, 2002, pág. 16), lo cual pone de manifiesto que dentro de la ciencia las dos maneras de experimentación que se trabajan son validas.

En el caso de la física específicamente, como mencionan Ferreiros & Ordoñez (2012) “los experimentos cualitativos han sido parte fundamental de los procesos de formación de conceptos”, es decir, que se ha llegado a comprender los fenómenos físicos sin realizar mediciones o tomar 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 teóricos.

Por otro lado, cuando se hace referencia a los tipos de experimentos es preciso mencionar el modo en el que es visto el experimento en comparación con la teoría. Una de las formas de concebirlo es desde una imagen tradicional desde la cual se piensa que el realizar experimentos solo es pertinente con base a preguntas y conceptos estrechamente relacionados con la teoría, pero como ya se ha visto la experimentación tiene vida propia, es decir, se encuentra frente a la necesidad de distinguir entre lo que es experimentación exploratoria y guiada. La primera como

aquella que se encuentra en la base de la ciencia cuando aún no se tiene una teoría consistente si no se está en la búsqueda de conceptos adecuados. La segunda, tiene como propósito el reflexionar en torno a ramas de la ciencia ya desarrolladas.

Desde la experimentación exploratoria se trabaja a partir de un nuevo experimento o dispositivo a partir del cual se prueba realizando diversas variaciones con el fin de percibir lo que pasa, mientras que en la experimentación guiada se centra en probar diseños experimentales el cual está ligado directamente a una teoría. Con lo anterior no se quiere decir que la relación teoría y experimento solo es uno en función del otro, si no que esta es de diversas clases lo cual muestra que la investigación experimental es de los dos tipos: experimental y guiada que hacen parte interactiva de la investigación.

Las anteriores distinciones realizadas en torno a la topología de la experimentación, permite establecer como lo expone Ferreiros & Ordoñez (2002), una clasificación de cuatro tipos de experimentación:

- Experimentación cualitativa exploratoria.
- Experimentación cualitativa guiada.
- Experimentación cuantitativa exploratoria.
- Experimentación cuantitativa guiada.

Adicionalmente se hace preciso manifestar como a lo largo del tiempo la practica experimental a evolucionado, debido a que los procedimientos se han vuelto más mecánicos lo cual permite que sean más fácil de reproducir, esto no quiere decir que los experimentos realizados por personajes como Newton no sean tan validos debido a que fueron realizados de una manera más artesanal.

Hasta el momento se ha realizado una contextualización general de cómo se ha concebido el experimento dentro de la ciencia, específicamente en la física, lo cual ha llevado a hacer mención del tipo de experimentación que se puede trabajar y el papel que ha tenido dentro de la construcción de teorías científicas. Ahora se dirigirá la discusión alrededor del papel que tiene la experimentación dentro de la educación específicamente en el impacto que tiene dentro de la enseñanza de alguna temática en particular.

Hodson (1994), menciona que las razones por las cuales los docentes hacen uso de actividades experimentales dentro de su labor de enseñanza son diversas, pero se pueden agrupar en cinco categorías:

1. “Para motivar, mediante la estimulación del interés y la diversión.
2. Para enseñar las técnicas de laboratorio.
3. Para intensificar el aprendizaje de los conocimientos científicos.
4. Para proporcionar una idea sobre el método científico y desarrollar la habilidad en su utilización.
5. Para desarrollar determinadas <<actitudes científicas>> tales como la consideración con las ideas y sugerencias de otras personas, la objetividad y la buena disposición para no emitir juicios apresurados” (Hodson, 1994, pág. 300).

Las anteriores categorías son solo una de las maneras en que puede ser concebida la actividad experimental dentro del proceso enseñanza/ aprendizaje de una determinada temática. Los diferentes enfoques que se plantean traen consigo ciertas ventajas e inconsistencias. Cuando se considera que el trabajo práctico puede ser usado como motivación, se muestra como una oportunidad para poner en práctica métodos de aprendizaje más activos, los cuales permiten una mejor interacción entre el profesor y los alumnos, además de que se adaptan más a los gustos del alumno, aun así no se puede dejar de lado la idea de que no se motiva de la misma manera todos los estudiantes y generar despertar ese interés depende de las actitudes que cada uno tenga.

Otra de los motivos por los cuales se hace el uso de actividades prácticas es la adquisición de ciertas destrezas, la cual es una de las posiciones que resulta más absurda ya que pensar que una habilidad desarrollada en determinada práctica se logre adaptar a una actividad de la vida real u otro tipo de actividad experimental resulta ilógico, ya que ciertas habilidades se utilizan una única vez, es decir, no se puede pensar que el trabajo práctico sea estrictamente necesario para adquirir ciertas habilidades sino que estas son indispensables para un mejor desarrollo del trabajo práctico.

En relación con lo anterior no se puede ignorar que hay ciertas habilidades que se les puede dar cierta importancia debido a que servirán para realizar actividades de aprendizaje más útiles pero eso no conlleva a que no tenerlas se convierta en un obstáculo para el aprendizaje.

Visto el trabajo práctico como el que permite aprender conocimientos científicos y otros métodos de la ciencia, se puede apreciar que en reiteradas ocasiones la actividad experimental termina convirtiéndose en seguir una receta con la cual se busca una comprensión de conceptos pero termina convirtiéndose en una pérdida de tiempo, la cual en definitiva logra generar mayor confusión.

Adicionalmente, se piensa que el trabajo práctico contribuirá para que se aprecie más las actividades realizadas por los científicos generando que se tenga una posición más objetiva, libre de prejuicios. Aunque resulta difícil el pensar que la medición de datos, con la cual se busca una correspondencia a lo que se muestra en un libro o se plantea desde la teoría, consiga desarrollar una actitud más crítica que permita al momento de emitir un juicio tener una actitud más imparcial y sustentada.

En medio de todo lo que se quiere que el alumno consiga con el trabajo práctico se evidencia cómo por estar pendientes los alumnos de todos los aspectos, adoptan ciertas actitudes como una estrategia frente a lo que deben realizar, entre esas encontramos:

- Adoptar un enfoque estilo receta.
- Concentrarse en un único aspecto del experimento despreciando así los otros.
- Comportamiento aleatorio
- Convertirse en ayudantes de un grupo que termine guiando.

Sumado a eso está el hecho de que se busca la simplificación del experimento a partir de eliminar pasos, usar diversos instrumentos tecnológicos que faciliten la obtención, análisis de datos y reducción de variables a considerar.

Lo más importante a resaltar es que se hace necesario reconceptualizar el trabajo práctico en el sentido de que muchas veces es tan utilizado que pierde su importancia, además que se piensa que sirve para alcanzar todos los objetivos de aprendizaje. Sería preciso para darle una mejor orientación que:

- Se establezca un propósito de lección concreto.
- Se seleccione una actividad de aprendizaje que se adapte a esos objetivos.

Lo anterior debe estar en sintonía con los tres aspectos de la ciencia más relevantes:

- El aprendizaje de la ciencia.
- El aprendizaje sobre la naturaleza de las ciencias
- La práctica de la ciencia.

Cada uno de los aspectos tiene un enfoque diferente pero generalmente en el momento de la práctica no consideran que haya una distinción de la actividad que se debe realizar. Aunque al final son tres aspectos que se complementan entre sí.

Por otro lado, en relación a esto se evidencia la necesidad de hacer referencia desde qué perspectiva se va a trabajar, para nuestro caso, se propone una perspectiva fenomenológica,

desde la cual es preciso hacer ciertas precisiones que permiten explicar a qué hacemos referencia cuando se parte desde lo fenomenológico.

En primer lugar se va a considerar que el fenómeno que se observa es tal como es, no tienen aspectos ocultos, lo cual implica que las descripciones y/o explicaciones que se realicen de este, no van a requerir de entidades ocultas más allá de lo que se ve. En otras palabras las explicaciones sobre lo que sucede, sólo se pueden dar en términos de lo que se aprecia. Con relación a esto se puede evidenciar que:

“Para algunos pensadores este tipo de elaboraciones son consideradas como meramente descriptivas y con poco carácter explicativo. Aquí no se comparte tal punto de vista por cuanto no se considera que la explicación deba estar dada en términos de las causas últimas del fenómeno o de las esencias abstractas del mismo”. (Malagón Sánchez, Sandoval Osorio, & Ayala Manrique, 2013, pág. 123)

Lo anterior confirma que el interés para nuestro caso es hablar del fenómeno desde lo perceptible, inicialmente se realiza una descripción en términos cualitativos de lo que se está apreciando, considerando que esta manera de hablar del fenómeno tiene tanta validez como la toma de datos.

Adicionalmente, considero que el fenómeno se presenta ante un sujeto, es externo a él, por lo tanto, de acuerdo a como el sujeto vea el fenómeno este puede llegar a cambiar ya que la descripción del fenómeno está sujeta al sujeto; como un ejemplo se puede pensar en la situación de un automóvil que se está moviendo con velocidad constante. Alguien podría ver ecuaciones de movimiento mientras otro está interesado en analizar las fuerzas que están actuando sobre el automóvil, lo cual muestra cómo los dos sujetos están observando un fenómeno diferente o de forma diferente. Malagón, Sandoval & Ayala (2013), plantean que no siempre se está frente al mismo fenómeno, debido a que este se transforma al tiempo que se realizan organizaciones distintas de este, lo cual sugiere que se debe insistir en la relación que existe entre los modos de concebir y de hablar que están de base en el camino de la experiencia.

Con base a las precisiones realizadas se plantea que sólo se pueden hacer organizaciones en relación a lo que el fenómeno muestra, es decir, las explicaciones que se elaboren sólo pueden estar en torno de lo que este manifieste. Como un ejemplo relacionado con las actividades

experimentales que se buscan proponer, está cómo al pasar luz blanca por un prisma se observa como efecto como la luz se descompone en diferentes colores (las diferentes longitudes de onda que la constituyen), para dar cuenta de este efecto no se requiere pensar en la estructura molecular del prisma.

Considerando entonces el papel del experimento en la enseñanza de las ciencias desde una perspectiva fenomenológica, las diferentes actividades experimentales propuestas se relacionan con dos de los aspectos considerados por Malagón, Sandoval & Ayala (2013): ampliación de la experiencia y formalización de relaciones. En este orden de ideas, la intención inicial de realizar las actividades experimentales es la construcción de hechos de observación en los cuales se recalquen los rasgos más relevantes del fenómeno, en esta situación poder evidenciar casos de superposición y estados únicos. Desde esta posición se podría decir que pensar la actividad experimental como aquella a partir de la cual se logra verificar relaciones conceptuales construidas en la ciencia es un punto de vista poco relevante sobre todo si se piensa en cómo esto va a contribuir para que el sujeto llegue a una comprensión.

Las actividades experimentales diseñadas servirán como una herramienta para ampliar la experiencia del sujeto en la medida de que inicialmente cuando se habla de superposición de estados y estados bien definidos en la mecánica cuántica, no se tienen una experiencia sensible en relación a estos dos conceptos que se encuentran de base. Por eso las diferentes actividades servirán para construir el campo de efectos desde los cuales se puede partir para una explicación entorno a los fundamentos de la mecánica cuántica anteriormente mencionados.

Otro de los aspectos a referirse es la formalización, la cual tiene importancia si se considera que:

“Formalizar es un proceso del pensamiento a través del cual se da forma a los propios modos “internos” de reconocer y elaborar el mundo y a los aspectos “externos” según los cuales el acaecer del mundo puede ser reconocido. Formalizar es pues una parte esencial del proceso de construcción del conocimiento caracterizado ante todo por la elaboración y uso de estrategias según las cuales los “diversos modos de mirar” son adaptados a aspectos de una realidad que es a su vez organizada de acuerdo a estos modos de conocer” (Ayala Manrique, Garzón Barrios, & Malagón Sánchez, 2008, págs. 21-22)

En este sentido, cuando se realiza una formalización se hace referencia a la construcción de palabras, dibujos, simbología, proposiciones, entre otras, que permitan dar cuenta del fenómeno. En este caso va estrechamente relacionado a cómo a partir de la simbología que utiliza Feynman de los aparatos de Stern–Gerlach se puede construir una representación que dé cuenta de los efectos que se observan en las diferentes actividades a realizar. Lo cual en definitiva va a permitir que se construya una forma de hablar del fenómeno que está enfocada con el objetivo que se ha propuesto el cual redunde en la construcción de explicaciones alrededor de los fundamentos de la mecánica cuántica.

CAPÍTULO II

SOBRE LA NOCIÓN DE ESTADO Y EL PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN

Necesidad de una nueva teoría

La mecánica clásica se ha desarrollado a lo largo del tiempo evidenciándose como está se aplica a un amplio número de sistemas, sus leyes y fundamentos como lo menciona Dirac (1967), son presentados de manera tan sencilla que se perciben como difíciles de alterar o modificar. Aun así, ha surgido un nuevo esquema denominado mecánica cuántica a partir del cual se ha logrado dar una explicación más precisa de los fenómenos a escala atómica.

La necesidad que surgió para constituir un camino diferente al de la mecánica clásica nace de los hechos experimentales, para los cuales los fundamentos de la mecánica clásica no bastaban para dar una explicación a lo que se estaba observando. Un ejemplo de las limitaciones que desde la mecánica clásica se presentan, mencionado por Dirac (1967), es el comportamiento de la luz. Por un lado están los fenómenos de refracción y difracción, desde los cuales se hace uso de una teoría ondulatoria para realizar una explicación de lo que se observa, mientras que en el caso que se hable sobre la emisión fotoeléctrica se debe considerar que la luz está constituida por pequeñas partículas denominadas fotones, a las cuales se les asigna una energía y momento definidos de acuerdo a la frecuencia de la luz.

Pero este comportamiento como onda o partícula no solo se le atribuye a la luz sino que se vuelve una generalidad, debido a que como plantea Dirac:

“Todas las partículas materiales tienen propiedades ondulatorias, que se ponen de manifiesto en condiciones adecuadas. Este es un ejemplo muy sorprendente y característico de los fallos de la mecánica clásica, que no radican simplemente en una inexactitud de sus leyes de movimiento, sino en una insuficiencia de sus conceptos para proporcionar una descripción de los fenómenos atómicos” (Dirac, 1967, pág. 17)

No solo los hechos experimentales muestran inconvenientes a partir de los cuales se debe pensar en una nueva mirada. Por otro lado, Dirac presenta que la necesidad de distanciarse de las

ideas clásicas también está determinada por razones filosóficas, ligadas a la idea de lo que es grande y pequeño, términos considerados relativos, debido a que se evidencia que las explicaciones que se realizan de un sistema es el todo en función de las partes que lo constituyen, esto pone de manifiesto que no se llega a nada cuando las explicaciones que se realizan de lo grande se hace en función de lo pequeño. Con lo anterior se hace evidente la necesidad de modificar las ideas clásicas, de modo que la idea de tamaño adquiriera un carácter absoluto.

En este sentido, es conveniente aclarar qué se considerara como grande y qué se considerara pequeño, para ello hay que recordar que “a la ciencia solamente le incumben los objetos observables y que únicamente podemos observar un objeto si interacciona con alguna influencia externa. Todo acto de observación va acompañado necesariamente de una alteración del objeto observado” (Dirac, 1967, pág. 17)

Lo anterior pone de manifiesto que al momento de realizar una observación el sistema de estudio se verá alterado, pero de acuerdo al sistema la alteración puede ser grande o pequeña. En relación al grado de alteración que se cause al momento de realizar una observación se considerará un objeto como grande o pequeño, es decir, que un objeto pequeño es aquel en el que la alteración que produce la observación no puede ser despreciada y se considera que es un objeto grande cuando la alteración causada puede ser despreciada.

En el caso en el cual se considera que el objeto es grande se podrá hacer uso de la mecánica clásica. Pero cuando la alteración sobre el objeto no es despreciable, es decir, se considera como pequeño, es precisa una nueva mirada para construir explicaciones en torno a él.

Noción de estado

Todo sistema atómico está constituido por partículas o cuerpos a los cuales se les asignan ciertas propiedades y en relación a las mismas se realiza una descripción del comportamiento de este sistema. En este sentido, podemos definir como estado a cada una de esas formas de estar del sistema en un instante de tiempo en relación con una cualidad, lo cual permite realizar una caracterización del sistema.

Retomando las ideas clásicas se plantea que es posible especificar el estado de un sistema en relación a variables dinámicas del mismo, pero cuando se habla de un sistema atómico se

debe considerar que no se puede realizar la medición de variables dinámicas simultáneamente debido a que en el momento de observar el sistema la perturbación sobre el mismo es incontrolable lo cual conlleva a una limitación del número de datos que se atribuyan al sistema. Esto implica que “el estado de un sistema atómico tiene que caracterizarse por menos datos o por datos más imprecisos que un conjunto completo de valores numéricos de todas las coordenadas y velocidades en un instante de tiempo particular” (Dirac, 1967, pág. 24)

Para la mecánica cuántica el estado del sistema queda caracterizado por el vector de estado el cual contiene toda la información conocida en relación al sistema en un instante de tiempo.

Principio de superposición

Desde la mecánica cuántica el principio de superposición plantea, “la relación entre los estados, de forma que cuando un sistema está en un estado bien definido, a la vez se puede considerar que está parcialmente en cada uno de una serie de estados” (Dirac, 1967, pág. 25) . Esto conlleva a que debe pensarse el estado original como el resultado de una superposición de otros estados, idea que solo puede ser aceptada desde esta mirada y que es compartida en el ámbito de la física.

Desde esta perspectiva como lo menciona Spinel (2009), es posible que un conjunto de dos o más estados, se puedan superponer para formar un nuevo estado. Pero el poder expresar un estado como una superposición de una serie de otros estados está directamente relacionado con un proceso matemático.

Adicionalmente desde el contexto de la mecánica cuántica, la superposición está ligada a la idea de que el observador al observar el sistema perturba de manera incontrolable dejando el sistema en un estado específico. En este caso, la máxima información que se puede tener del sistema será justamente después de la medición, debido a que la medición modifica drásticamente el estado del sistema, es decir, no se puede conocer el estado previo que tiene el sistema, debido a que al observar se pierde la información del estado en el cual estaba el sistema, esto quiere decir que no existe una relación causal entre el estado inicial y final de un sistema cuántico.

Formalización del principio de superposición y la noción estado de un sistema cuántico

La mecánica cuántica ha traído consigo nuevos formalismos matemáticos debido a la necesidad de apartarse de los principios clásicos, los cuales no son suficientes para responder a los resultados encontrados experimentalmente.

Desde esta nueva perspectiva, se requiere que el estado de un sistema y las variables dinámicas del mismo estén relacionados de una manera diferente la cual llega a ser incomprensible desde el punto de vista clásico. En otras palabras, matemáticamente los estados y las variables dinámicas deben tener una nueva cantidad matemática que las represente. En ese sentido:

“El nuevo esquema constituirá una teoría física precisa cuando se hayan especificado todos los axiomas y reglas que rigen las cantidades matemáticas se hayan dado ciertas leyes que relacionen los hechos físicos con dichas cantidades, de tal manera que de unas condiciones físicas dadas puedan inferirse ecuaciones matemáticas y recíprocamente. En la aplicación de la teoría deberíamos disponer de cierta información física, que procederíamos a expresar en forma de ecuaciones entre las cantidades matemáticas”
(Dirac, 1967, pág. 27)

Lo anterior plantea que se construye un nuevo aparato matemático desde el cual se realiza la descripción de los sistemas físicos que se manejan desde esta nueva perspectiva, la cual se encuentra en concordancia con los resultados que se obtienen experimentalmente.

Desde la mecánica cuántica la superposición sugiere que entre los estados exista un proceso aditivo el cual dé cuenta de nuevos estados. Esto quiere decir que cada estado debe estar asociado con cantidades matemáticas que al sumarse entre sí den como resultado una cantidad del mismo tipo, en ese sentido son los vectores las cantidades matemáticas que cumplen con este requisito. Para este contexto es preciso generalizar que los vectores se encuentran en un espacio con infinitas dimensiones.

Los vectores asociados a los estados de un sistema en mecánica cuántica se denominarán con el nombre de vectores Kets o simplemente Kets y quedarán representados por el símbolo

$|\rangle$. En el caso que se quiera especificar un Ket con una letra o símbolo se deberá colocar entre los dos signos, por ejemplo la C, al denotar el Ket sería $|C\rangle$.

En relación a los kets se establecen una serie de criterios:

- Los vectores Kets asociados a estados del sistema pueden multiplicarse por números complejos y adicionalmente sumarse entre ellos, lo cual daría origen a nuevos Kets, por ejemplo:

$$C_1|\alpha\rangle + C_2|\beta\rangle = |\varphi\rangle$$

C_1 Y C_2 representan números complejos arbitrarios.

- Se puede efectuar con los kets operaciones lineales más generales, como lo es derivar, integrar, etc. Como un ejemplo derivar respecto a x para obtener un nuevo Ket

$$\frac{d|z\rangle}{dz} = |z\rangle$$

- Si un vector Ket puede ser expresado linealmente en función de otros, se considera como dependiente de ellos. En el caso que un conjunto de Kets no pueda expresarse linealmente en función de otros se consideran como independientes.

A partir de lo anterior se considera:

“A cada estado de un sistema dinámico en un instante de tiempo particular le corresponde un ket, siendo la correspondencia tal que si un estado está definido como superposición de otros dos, su correspondiente ket puede expresarse linealmente en función de los kets correspondientes a dichos estados y recíprocamente” (Dirac, 1967, págs. 28-29)

En definitiva el estado del sistema se representara por un Ket, el cual a su vez puede representarse como una superposición de otros, los cuales representan estados base.

Existen otro tipo de vectores denominados vectores Bra o simplemente Bras, que son el correspondiente dual de los Kets y se representan con el símbolo $\langle|$. Al igual que los Kets, cuando se quiere especificar un bra en particular, se utiliza una letra o símbolo el cual se deberá colocar entre los dos signos, por ejemplo A, al denotar el bra será $\langle A|$. En tal caso se empleara la misma letra para denotar el Ket y su bra correspondiente.

Considerando la relación biyectiva que existe entre los vectores bra y los vectores ket, Dirac (1967) plantea que “todo estado de nuestro sistema dinámico en un instante particular puede especificarse tanto por la dirección de un bra como por la de un ket”, es decir, que si el estado de un sistema está determinado por el Ket $|M\rangle$, también puede estar especificado por el bra $\langle M|$, ambos corresponden al mismo estado.

Un ejemplo de la superposición es la polarización de fotones, el cual se pensara en un inicio como un sistema de dos estados para el cual hay que considerar inicialmente que el fotón tiene una propiedad intrínseca denominada polarización.

Para esta situación inicialmente se plantea que existen dos direcciones de polarización, desde la teoría clásica se sugiere que la luz posee un campo eléctrico que oscila verticalmente y horizontalmente. Para cada dirección en la cual está oscilando se asocia que la luz puede estar polarizada en la dirección X o la dirección Y, adicionalmente puede quedar polarizada en otra dirección, la cual se obtiene a partir de la superposición de dos campos eléctricos.

Considerando ahora la situación desde la perspectiva cuántica, se debe suponer que:

“tenemos un solo fotón- y solamente uno-. No hay campo eléctrico que podamos discutir en la misma forma. Todo lo que tenemos es un fotón. Pero un fotón tiene que tener lo análogo a los fenómenos clásicos de polarización. Debe haber por lo menos dos clases diferentes de fotones. En principio, podrían pensar que debería haber una variedad infinita (...). Sin embargo, podemos describir la polarización de un fotón como un sistema de dos estados. Un fotón puede estar en el estado $|X\rangle$ o en el $|Y\rangle$ ” (Feynman, Leighton, & Sands, 1989, págs. 11-13)

Cada uno de los estados de polarización que tiene el fotón está relacionado con un haz de luz que está clásicamente polarizado, es decir, que el estado $|X\rangle$ se puede entender como el estado de polarización de cada fotón en un haz de luz que clásicamente se encuentra polarizado en la dirección X. Por otro lado, el estado $|Y\rangle$ corresponde al estado de polarización de cada uno de los fotones que pertenece a un haz de luz polarizado clásicamente en la dirección Y. Tomando estos dos estados como los estados base de un fotón podemos realizar una descripción del mismo en relación con su estado de polarización.

Para realizar la descripción es preciso considerar que a partir de polarizadores y luz blanca constituida por fotones, se puede formar una secuencia desde la cual se puede hablar de la polarización de un fotón. Supongamos que tenemos un polarizador con su eje en la dirección denominada Y, al enviar fotones hacia el polarizador cuando lo atraviesan, estos quedarán en el estado $|Y\rangle$ de polarización, si a continuación estos mismos fotones se encuentran con un segundo polarizador el cual también tiene su eje en la dirección denominada Y, todos los fotones continuarán en el mismo estado y atravesarán el polarizador llegando así la totalidad de los que pasaron el primer polarizador (Figura 1).

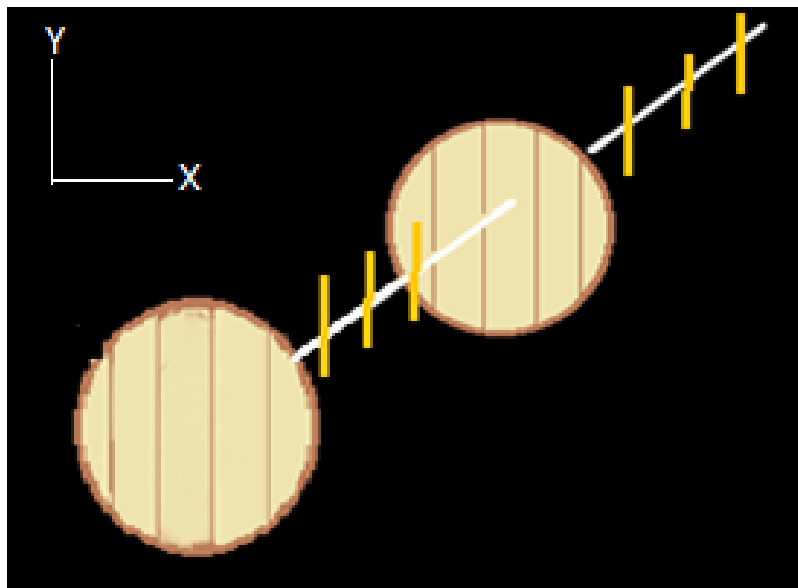


Figura 1. Dos polarizadores con su eje de polarización en la dirección Y

En el caso en el cual se tenga un polarizador con su eje en la dirección denominada Y, al enviar fotones hacia el polarizador cuando lo atraviesan, estos quedarán en el estado Y de polarización, igual que la situación anterior. Si a continuación estos mismos fotones se encuentran un segundo polarizador el cual tiene su eje en la dirección denominada X, todos los fotones que estaban en el estado Y no podrán atravesar el polarizador, por lo tanto al final de la secuencia no se saldrá ningún fotón (Figura 2).

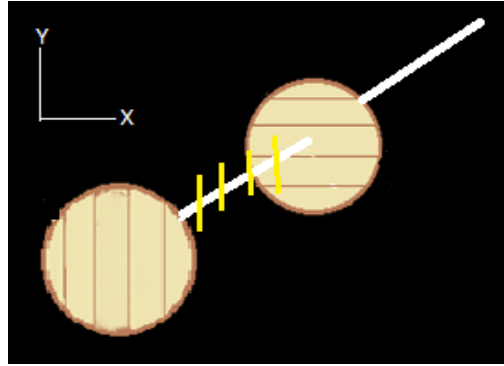


Figura 2. Dos polarizadores: El primero con eje de polarización en la dirección Y, el segundo con su eje de polarización en la dirección X.

Si por el contrario se tuviera una configuración similar a la primera pero el cambio sea que el eje de los polarizadores se encuentran en la dirección X , lo que se obtendra es que cuando pasan los fotones por el primer polarizador todos quedaran en el estado X de polarización, al encontrarse con el segundo polarizador podran atravesar el mismo y al final se obtendra el total de fotones que pasaron el primer polarizador (Figura 3).

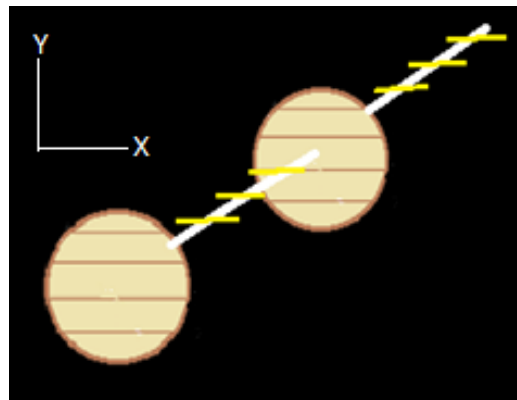


Figura 3. Dos polarizadores con su eje de polarización en la dirección X

Para representar las anteriores situaciones se le asignara a cada uno de los fotones un estado de polarización un vector representado por kets:

- Para el estado el cual quedan los fotones luego de atravesar el polarizador el cual tiene su eje en la dirección denominada Y, se asignará el estado de polarización $|Y\rangle$.
- Para el estado el cual quedan los fotones luego de atravesar el polarizador el cual tiene su eje en la dirección denominada X, se le asignará el estado de polarización $|X\rangle$.

Para representar las tres primeras situaciones se puede utilizar una representación parecida a la que propone Feynman para los aparatos Stern– Gerlach (ver apéndice – experimento de Stern- Gerlach), pero en este caso para los estados de polarización del fotón, para realizar dicha representación es preciso considerar que:

- El estado de polarización del fotón luego de atravesar el polarizador con el eje de polarización en la dirección Y se representara con el símbolo : $\left\{ \begin{matrix} PX \\ PY \end{matrix} \right\}$
- El estado de polarización del fotón luego de atravesar el polarizador con el eje de polarización en la dirección X se representara con el símbolo: $\left\{ \begin{matrix} PX \\ PY \end{matrix} \right\}$

Haciendo uso de la simbología establecida se representan las situaciones de manera que cuando los fotones atraviesan los diferentes polarizadores se tiene que:

- Primera y Tercera situación

$$\left\{ \begin{matrix} PX \\ PY \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} PX \\ PY \end{matrix} \right\} \quad |Y\rangle \rightarrow 100\%$$

$$\left\{ \begin{matrix} PX \\ PY \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} PX \\ Y \end{matrix} \right\} \quad |X\rangle \rightarrow 100\%$$

- Segunda situación

$$\left\{ \begin{matrix} PX \\ PY \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} PX \\ PY \end{matrix} \right\} \quad \rightarrow 0\%$$

Tiene un estado bien definido luego de pasar por el primer polarizador

Es decir que $|X\rangle$ y $|Y\rangle$ son considerados estados de polarización del fotón bien definidos.

Basándose en lo anterior y realizando una descripción cuánticamente de la polarización de los fotones que atraviesan los polarizadores. Si establecemos que $\langle 2|1\rangle$ es la amplitud de probabilidad para que un fotón que se encuentra inicialmente en el estado 1 llegue al estado 2 al atravesar los polarizadores. Podemos decir: $\langle 2|1\rangle$ es la amplitud de probabilidad para que un fotón que estando en el estado 1 cambie al estado 2. Las situaciones anteriores nos muestran que:

$$\langle Y|Y \rangle = 1$$

Mientras que otra situación nos da

$$\langle X|Y \rangle = 0$$

Del mismo modo

$$\langle X|X \rangle = 1$$

Como nos estamos refiriendo a estados bien definidos de polarización del fotón, se establecen cuatro amplitudes de probabilidad posibles las cuales podemos escribirlas como en la figura 4.

$$\begin{array}{cc} & |X\rangle & |Y\rangle \\ \langle X| & 1 & 0 \\ \langle Y| & 0 & 1 \end{array} \qquad \langle i|j \rangle = \delta_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{si } i \neq j \\ 1 & \text{si } i = j \end{cases}$$

Figura 4. Representación matricial de las amplitudes de probabilidad y condición de ortonormalidad

Esta organización en forma de matriz resume los fenómenos que se han estado describiendo en cada una de las situaciones con los polarizadores y muestra la condición de ortonormalidad que existe entre estados bien definidos, adicionalmente se evidencia que forman un conjunto de estados base.

Por otra parte podemos encontrar el caso en el cual el eje de polarización del primer polarizador se encuentra rotado 45° respecto al plano de referencia ortogonal (X-Y) al enviar fotones hacia el polarizador cuando lo atraviesan estos quedarán en el estado $|\alpha\rangle$ de polarización, si a continuación estos mismos fotones se encuentran con un polarizador el cual es idéntico al primero, todos los fotones atravesarán el polarizador y quedarán en el mismo estado de polarización $|\alpha\rangle$ (Figura 5).

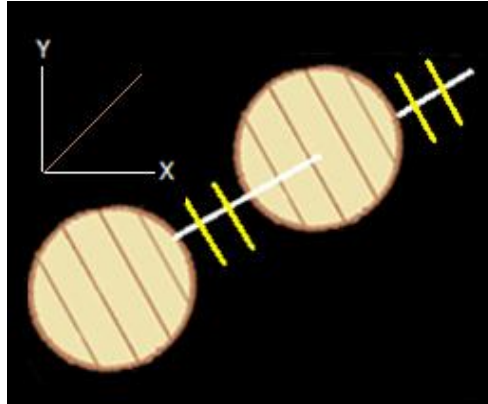


Figura 5. Dos polarizadores con su eje de polarización rotado 45° respecto al plano de referencia ortogonal (X, Y)

Si ahora consideramos el caso en el cual el eje de polarización del primer polarizador se encuentra rotado 45° respecto al plano de referencia ortogonal (X,Y), pero en dirección contraria a los polarizadores del anterior caso. Al enviar fotones hacia el polarizador cuando lo atraviesan, estos quedarán en el estado $|\beta\rangle$ de polarización, si a continuación estos mismos fotones se encuentran con un polarizador el cual es idéntico al primero, todos los fotones atravesarán el polarizador y quedarán en el mismo estado de polarización $|\beta\rangle$ (Figura 6).

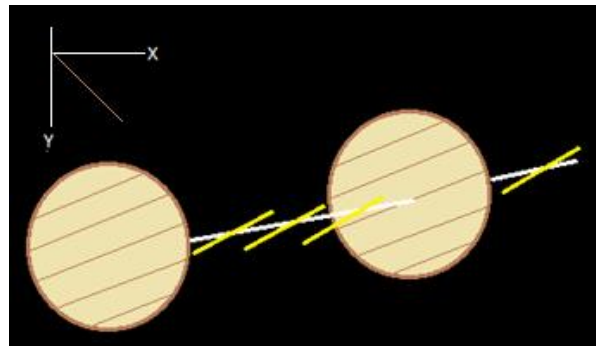


Figura 6. Dos polarizadores con su eje de polarización rotado 45° respecto al plano de referencia ortogonal (X, Y) contrarios a los de la figura 5.

Para el caso en el cual se tiene que el eje de polarización del primer polarizador está rotado 45° en relación al plano ortogonal (X,Y), al enviar fotones hacia el polarizador cuando lo atraviesan estos quedarán en el estado $|\alpha\rangle$ de polarización, posteriormente si estos mismos fotones se encuentran con un segundo polarizador rotado 45° respecto al plano de referencia ortogonal (X,Y), pero en sentido contrario al polarizador anterior, al final de la secuencia no saldrá ningún fotón (Figura 7).

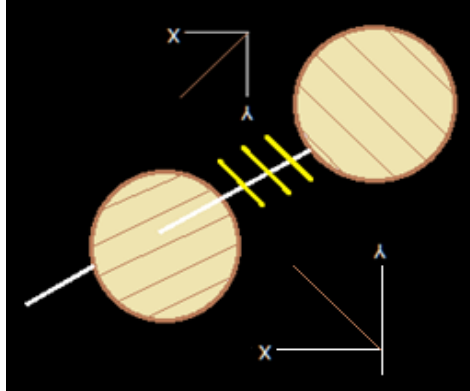


Figura 7. Dos polarizadores rotados 45° respecto al plano ortogonal (X, Y) en direcciones contrarias.

Así como en las tres primera situaciones se asignara a cada uno de los estados de polarización del fotón un vector representado por kets:

- Para el estado en que quedan los fotones luego de atravesar el polarizador el cual tiene su eje de polarización rotado 45° respecto al plano ortogonal (X,Y), se asignara el estado de polarización $|\alpha\rangle$.
- Para el estado en que quedan los fotones luego de atravesar el polarizador el cual se encuentra rotado 45° respecto al plano de referencia ortogonal (X,Y), pero en dirección contraria a los fotones del anterior caso, se asignara el estado de polarización $|\beta\rangle$.

Así como se trabajo con las primeras situaciones con polarizadores, se asignará en cada caso al estado de polarización del fotón el cual atraviesa diferentes polarizadores rotados, una representación similar a la utilizada por Feynman cuando hace mención de los aparatos de Stern-Gerlach, para lo cual se considera que:

- El estado de polarización del fotón luego de atravesar un polarizador que tiene su eje de polarización rotado 45° respecto al plano de referencia ortogonal (X,Y), se representará con el símbolo : $\left\{ \begin{matrix} R_\alpha X \\ R_\alpha Y \end{matrix} \right\}$
- El estado de polarización del fotón luego de atravesar el polarizador el cual tiene su eje de polarización rotado 45° respecto al plano de referencia ortogonal (X,Y)pero dirección contraria al anterior polarizador, se representara con el símbolo : $\left\{ \begin{matrix} R_\beta X \\ R_\beta Y \end{matrix} \right\}$

Haciendo uso de la simbología establecida se representan los diferentes casos a partir de los cuales se puede dar cuenta del estado de polarización del fotón en el momento en el cual los polarizadores que debe atravesar se encuentran girados respecto al plano ortogonal (X, Y). Cuando los fotones atraviesan los diferentes polarizadores se obtiene que:

- Primer y segundo caso

$$\begin{Bmatrix} R_{\alpha}X \\ R_{\alpha}Y \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} R_{\alpha}X \\ R_{\alpha}Y \end{Bmatrix} \quad |\alpha\rangle \rightarrow 100\%$$

$$\begin{Bmatrix} R_{\beta}X \\ R_{\beta}Y \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} R_{\beta}X \\ R_{\beta}Y \end{Bmatrix} \quad |\beta\rangle \rightarrow 100\%$$

- Tercer caso

$$\begin{Bmatrix} R_{\alpha}X \\ R_{\alpha}Y \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} R_{\beta}X \\ R_{\beta}Y \end{Bmatrix} \quad \rightarrow 0\%$$

Tiene un estado bien definido luego de pasar por el primer polarizador

Lo anterior quiere decir que $|\alpha\rangle$ y $|\beta\rangle$ son considerados estados de polarización bien definidos. Basándose en lo anterior y realizando una descripción cuánticamente de la polarización de los fotones que atraviesan los polarizadores rotados. Los casos anteriores nos muestran que:

$$\langle \alpha | \alpha \rangle = 1$$

Mientras que otra situación nos da

$$\langle \beta | \alpha \rangle = 0$$

Del mismo modo

$$\langle \beta | \beta \rangle = 1$$

Como nos estamos refiriendo a estados bien definidos de polarización del fotón, se establecen cuatro amplitudes de probabilidad posibles a partir de los estados de polarización en los que queda el fotón al atravesar los polarizadores rotados y que podemos escribir como en la figura 8.

$$\begin{array}{cc}
 & |\alpha\rangle & |\beta\rangle \\
 \langle\alpha| & 1 & 0 \\
 \langle\beta| & 0 & 1
 \end{array}
 \qquad
 \langle i|j\rangle = \delta_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{si } i \neq j \\ 1 & \text{si } i = j \end{cases}$$

Figura 8. Representación matricial de las amplitudes de probabilidad y condición de ortonormalidad que se obtiene cuando se han rotado los polarizadores

Esta organización en forma de matriz resume los fenómenos que se han estado describiendo en cada una de los casos con los polarizadores rotados y muestra la condición de ortonormalidad que existe entre los estados bien definidos que desde estos casos se establecen, adicionalmente se evidencia que estos forman un conjunto de estados base.

Es posible establecer una relación entre los dos conjuntos de estados base a partir de una transformación de base (ver Apéndice – Transformaciones de base), lo cual permite hacer una descripción de otro tipo de situaciones. Ahora podemos considerar el caso en el cual el primer polarizador tiene su eje en la dirección Y, se obtiene que así como en la primera serie contemplada con los polarizadores que al atravesar el primer polarizador los fotones quedarán en el estado Y, pero en el momento que se encuentran con el segundo polarizador rotado 45°, solo el 50% de los fotones que salieron del primer polarizador se encontrarán en el estado Y luego de atravesar el segundo polarizador y el 50 % restante estará en el estado X (Figura 9).

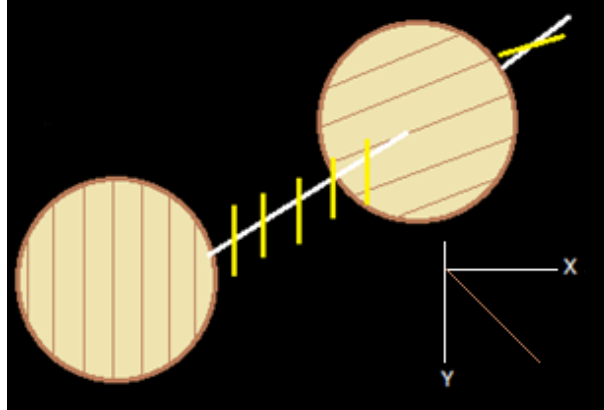


Figura 9. Dos polarizadores: El primero con su eje de polarización en la dirección Y el segundo rotado 45° respecto al plano ortogonal (X, Y)

Es preciso aclarar que en esta situación se estableciera que:

$$|\beta\rangle = -\frac{1}{\sqrt{2}}(|X\rangle - |Y\rangle)$$

Haciendo uso de la simbología establecida se representan los casos con los polarizadores rotados de manera que cuando los fotones atraviesan los diferentes polarizadores se obtiene que:

$$\begin{cases} \{PX\} \\ \{PY\} \end{cases} \quad \begin{cases} \{R_{\beta}X\} \\ \{R_{\beta}Y\} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \rightarrow 50\% |X\rangle \\ \rightarrow 50\% |Y\rangle \end{array}$$

Dentro de la mecánica cuántica al realizar la descripción de un sistema es preciso hacer mención de la probabilidad de encontrar en cada uno de los estados posibles al mismo, en definitiva, la probabilidad muestra la evolución temporal del sistema cuando se hace referencia a cada uno de los estados en los cuales este se puede encontrar. La probabilidad se define como:

$$P = |\langle 2|1\rangle|^2$$

En cada uno de las situaciones con polarizadores se puede establecer la probabilidad de que el fotón termine en determinado estado, para este caso se define cada uno de los estados con un vector.

$$|X\rangle = |X\rangle + 0|Y\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$|Y\rangle = 0|X\rangle + |Y\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$|\alpha\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|X\rangle + |Y\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$|\beta\rangle = -\frac{1}{\sqrt{2}}(|X\rangle - |Y\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

- **Primera situación:** Cuando el fotón al pasar por el primer y segundo polarizador su estado es $|Y\rangle$

$$P = |\langle Y|Y\rangle|^2 = \left| \begin{pmatrix} 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right|^2 = |1|^2 = 1$$

- **Segunda situación:** Cuando el fotón pasa por un primer polarizador el fotón queda en el estado $|Y\rangle$ y se encuentra con un segundo polarizador el cual deja los fotones en el estado $|X\rangle$

$$P = |\langle X|Y\rangle|^2 = \left| \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right|^2 = |0|^2 = 0$$

- **Tercera situación :** Cuando el fotón al pasar por el primer y segundo polarizador su estado es $|X\rangle$

$$P = |\langle X|X\rangle|^2 = \left| \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right|^2 = |1|^2 = 1$$

- **Cuarta situación:** Cuando el fotón pasa seguidamente por dos polarizadores rotados 45° respecto al plano ortogonal (X, Y).

$$P = |\langle \alpha|\alpha\rangle|^2 = \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right|^2 = \left| \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right|^2 = \left| \frac{2}{2} \right|^2 = |1|^2 = 1$$

- **Quinta situación:** Cuando el fotón pasa seguidamente por dos polarizadores rotados 45° en relación al plano ortogonal (X, Y) en dirección contraria a los polarizadores rotados de la cuarta situación.

$$P = |\langle \beta|\beta\rangle|^2 = \left| -\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & -1 \end{pmatrix} -\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} \right|^2 = \left| \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right|^2 = \left| \frac{2}{2} \right|^2 = |1|^2 = 1$$

- **Sexta situación:** Cuando el fotón pasa por un polarizador rotado 45° en relación al plano ortogonal (X, Y) y seguidamente pasa por un polarizador rotado 45° en relación al plano ortogonal (X, Y) en dirección contraria al anterior.

$$P = |\langle \beta|\alpha\rangle|^2 = \left| -\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & -1 \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right|^2 = \left| -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right|^2 = \left| \frac{0}{2} \right|^2 = |0|^2 = 0$$

- **Séptima situación:** Cuando el fotón pasa por un primer polarizador y su estado es $|Y\rangle$, luego atraviesa un segundo polarizador rotado 45° respecto al plano ortogonal (X,Y) y su estado es $|\beta\rangle$.

$$P = |\langle \beta | Y \rangle|^2 = \left| \left(0 \quad 1 \right) - \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right|^2 = \left| 0 - \frac{1}{\sqrt{2}} \right|^2 = \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \right|^2 = \frac{1}{2} = 0,5 \rightarrow 50\%$$

Principios básicos de la mecánica cuántica

En relación al sistema de dos estados (polarización del fotón), se logran obtener los principios básicos de la mecánica cuántica.

1. Existencia de estados bien definidos (Estados base).

Los estados base generan el espacio geoméricamente y cumplen con la característica de ortonormalidad.

$$\langle j | i \rangle = \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases} \quad \textit{linealmente independientes}$$

Ejemplo: Para el caso de los polarizadores se establecieron inicialmente los estados:

$$|X\rangle = |X\rangle + 0|Y\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad |Y\rangle = 0|X\rangle + |Y\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

2. Los estados se pueden escribir como una combinación lineal de los estados base

Ejemplo

$$|\alpha\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|X\rangle + |Y\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Para la mecánica cuántica la superposición implica interferencia

3. Para que el estado base de un estado inicial a un estado final este debe pasar por todos los estados (camino)

$$\langle X | \varphi \rangle = \sum_i \langle X | i \rangle \langle i | \varphi \rangle$$

Se define la relación de completos o de clausura la cual es:

$$\hat{1} = \sum_i |i\rangle \langle i|$$

En relación a la formalización que se realiza del sistema de dos estados (polarización del fotón), y la simbología utilizada, se hace evidente que existen actividades que permiten hacer más comprensible la noción de estado y el principio de superposición sin dejar de lado los planteamientos a nivel matemático que se deben desarrollar. En última instancia, se logra evidenciar los principios generales que se encuentran en la base de la mecánica cuántica.

CAPÍTULO III

SOBRE LAS ACTIVIDADES EXPERIMENTALES: CONFIGURACIONES PARA EVIDENCIAR LA NOCIÓN DE ESTADO Y EL PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN

Las actividades experimentales dentro de la ciencia y específicamente en la física se muestran como una de las bases necesarias para el desarrollo de teorías considerando que estas tienen igual de importancia que la teoría, en este sentido, cuando se piensa en la enseñanza/aprendizaje de alguna temática de la ciencia, en este caso de física, se hace pertinente que estas actividades sean parte del trabajo que se realiza en al momento de buscar que se comprenda determinada temática o concepto.

Aunque cabe aclarar que es necesario establecer cómo se va a ver la actividad experimental, ya que es preciso que sea una actividad que logre cumplir con los objetivos propuestos. Para este caso, nos basamos en una perspectiva fenomenológica desde la cual se establece que las descripciones que se realizan del fenómeno a observar sean en términos de lo que se percibe, lo cual se encuentra estrechamente ligado con la forma en que el sujeto lo observe.

Adicionalmente se va a relacionar las actividades con dos aspectos que se proponen desde la perspectiva fenomenológica, la ampliación de la experiencia y la formalización de relaciones, lo cual finalmente permita construir explicaciones sobre la noción de estado y el principio de superposición. Simultáneamente se consideraran las formalizaciones que se han realizado de experiencias similares en las cuales se logra tener el mismo efecto, descomposición de haces.

En cada una de las actividades que se van a trabajar a continuación se busca realizar la respectiva formalización, estableciendo un Ket para la descripción de los diferentes estados del sistema, una representación y esquema de cada tipo de configuración propuesta en las actividades. Finalmente se pretende el poder evidenciar como en el capítulo II, los principios básicos de la mecánica cuántica, que surgen a partir de trabajar alrededor de la noción de estado y principio de superposición.

Descripción de las actividades experimentales

Las actividades experimentales son construidas teniendo como base el uso de luz blanca. Para los dos primeros se hace uso de prismas y el último hace uso de polarizadores, a continuación se describe en detalle cada uno de las actividades propuestas.

Actividad 1

El diseño que se plantea se constituye de una linterna de luz blanca, un colimador y un prisma, la disposición de los elementos se realiza como se muestra en la Figura 10, la función del colimador es enfocar en un solo haz la luz que sale de la linterna, que será el que atravesará el prisma.

El efecto que se percibe es como la luz se descompone en diferentes colores, desde lo cual se puede empezar a hablar de la luz blanca como una superposición de los colores que se perciben.



Figura 10. Disposición de los elementos para la actividad 1

Actividad 2

El diseño que se plantea está constituido por una linterna de luz blanca, un colimador, dos prismas y separadores, la disposición de los elementos se realiza como se muestra en la Figura 11. Para la configuración de esta actividad se ha considerado los efectos que se percibieron la actividad anterior.

Con base al diseño de la actividad 1 se plantea que al atravesar la luz blanca por un prisma se obtienen diferentes colores, si eso es cierto, entonces ¿Qué sucederá si solo un color de los

obtenidos de la luz blanca pasa por un prisma?, en búsqueda de una respuesta se separa un solo color, el cual posteriormente atraviesa un segundo prisma. Como respuesta se observa que el color no presenta el mismo comportamiento que la luz blanca, por el contrario se mantiene después de haber atravesado el prisma.

En relación a esto se puede decir que aunque la luz blanca se considere como una superposición de los diferentes colores que se obtienen cuando esta atraviesa el prisma, cada uno de los colores del prisma es un color base, es decir, que no se compone de ningún otro color por lo cual al pasar por un segundo prisma lo que se observa es de nuevo el mismo color que lo atravesó.



Figura 11. Disposición de los elementos para la actividad 2

Actividad 3

El diseño que se plantea se forma haciendo uso de una linterna de luz blanca, un colimador y dos polarizadores. La disposición de cada uno de los materiales se realiza como se observa en la Figura 12, siendo colocada de primeras la linterna posteriormente el colimador y por último los dos polarizadores distanciados entre sí.

Para esta situación se deja el primer polarizador fijo mientras el otro va girando justo enfrente, al realizar esta acción se observa como la intensidad de la luz va disminuyendo, percibiendo que en el momento en que se ha girado 90° prácticamente la luz que se puede observar en el segundo polarizador es nula.



Figura 12. Disposición de los elementos para la actividad 3

Formalización de los montajes considerando las representaciones de los aparatos de Stern-Gerlach

Actividad 1

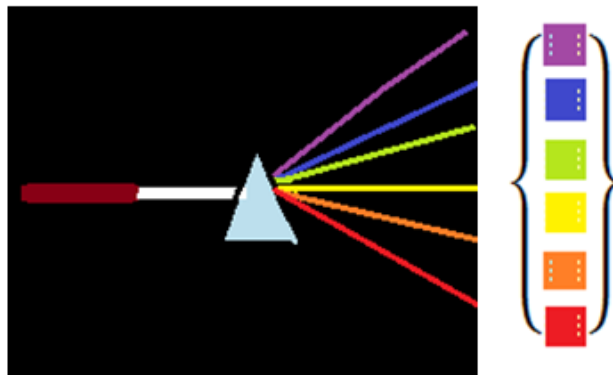


Figura 13. Esquema y representación de la actividad 1

Es preciso aclarar que el efecto que se obtiene por el prisma es el comparado con un aparato de Stern- Gerlach, debido a que cuando un haz de luz blanca entra en este, lo que se evidencia luego de atravesar el prisma es una descomposición de haces que para este caso son cada uno de los colores que componen la luz blanca.

La representación de la Figura 13, muestra el nuevo símbolo que se va a utilizar para representar el efecto que se produce con el prisma, en donde se obtiene toda la gama de colores cuando el haz de luz blanca lo atraviesa.

Adicionalmente a cada uno de los colores que son el resultado de hacer pasar luz blanca por un prisma, se le puede asociar un ket que represente a cada uno. En consecuencia con esto se asignan los siguientes kets:

- Color morado..... $|M \rangle$
- Color azul..... $|A_z \rangle$
- Color verde..... $|V \rangle$
- Color amarillo..... $|A_m \rangle$
- Color Naranja..... $|N \rangle$
- Color rojo..... $|R \rangle$

En este sentido se puede establecer la luz blanca como:

$$|B \rangle = \frac{1}{\sqrt{6}} (|M \rangle + |A_z \rangle + |V \rangle + |A_m \rangle + |N \rangle + |R \rangle)$$

Con lo anterior se evidencia “el principio de superposición el cual afirma que cualquier estado cuántico se puede expresar como una superposición de otros estados cuánticos” (Spinel Gómez, 2009, pág. 17), en este caso es la luz blanca la cual se puede escribir como una superposición de las diferentes luces de colores.

Actividad 2

Con base al nuevo símbolo que se obtuvo de la representación del diseño de la actividad 1, se hace uso de este para construir una representación de los efectos que se perciben en la actividad 2. La representación de la Figura 14, muestra el nuevo símbolo que se va a utilizar para representar el efecto que se produce cuando se realiza la configuración con dos prismas, en donde se obtiene al final solo uno de los colores que componen la luz blanca.

En este caso cuando se selecciona solo uno de los colores que se obtienen al atravesar la luz blanca y se hace pasar por un prisma idéntico al primero por el cual paso la luz blanca, se observa que el haz selecciona (según la figura el color azul), continuara siendo del mismo color. Lo anterior evidencia que luego de atravesar el primer prisma y seleccionar solo uno de los colores obtenidos se ha producido un haz filtrado en un estado puro, lo cual se puede comprobar al hacer pasar por un segundo prisma idéntico al anterior ese haz puro,

Lo anterior establece que:

$$|M \rangle, |A_z \rangle, |V \rangle, |A_m \rangle, |N \rangle \text{ y } |R \rangle$$

Se consideran estados puros debido a que no pueden escribirse como una combinación lineal de otros estados, es decir, el color azul que en este caso se selecciono no está compuesto de otros colores.

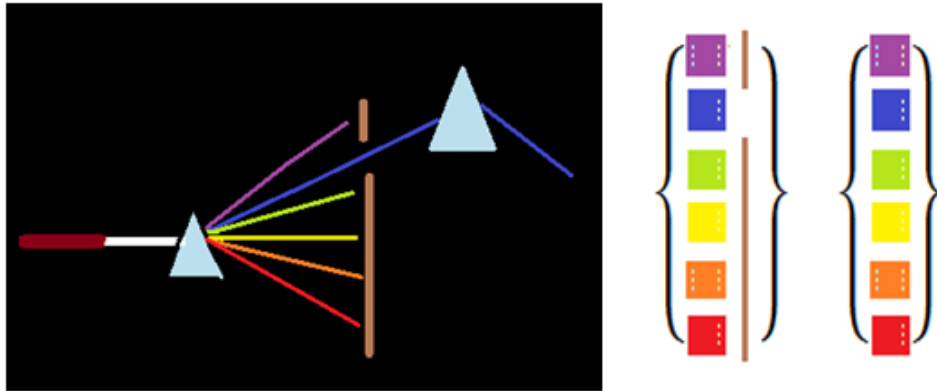


Figura 14. Esquema y representación de la actividad 2

Para poder evidenciar que cada uno de los colores se considera estados puros o bien definidos se realizarían los siguientes arreglos:

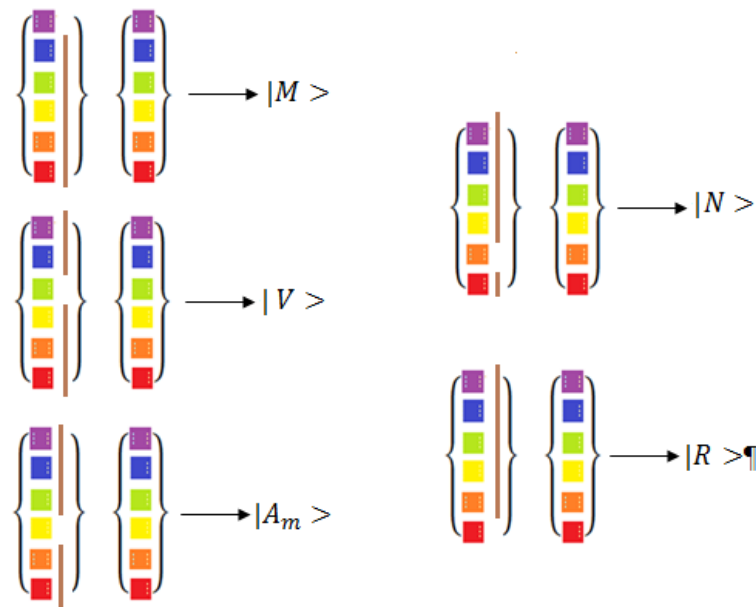


Figura 15. Arreglos para obtener estados puros o bien definidos

Actividad 3

En la búsqueda de un símbolo que represente el diseño utilizado donde se hizo uso de polarizadores (Figura 16) y con base a la simbología que establece Feynman para los aparatos de Stern- Gerlach, con los cuales el introduce los estados base y estados de superposición; se construye un nuevo símbolo que me representa los efectos que estoy percibiendo a partir del montaje que es la baja intensidad de luz al final que puede llegar a ser totalmente nula.

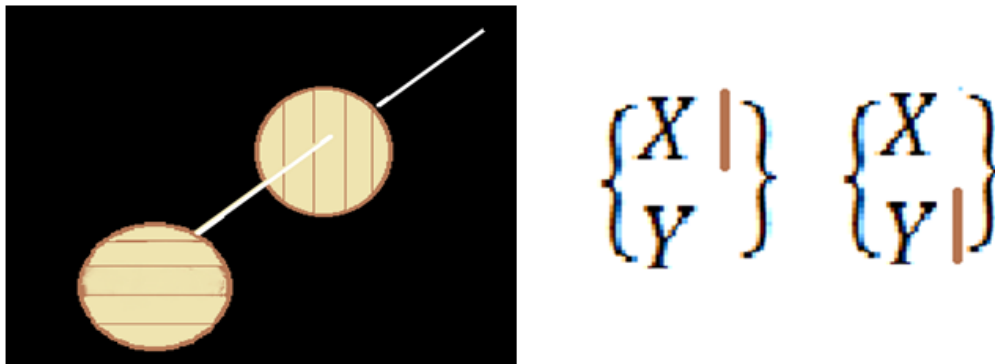


Figura 16. Esquema y representación de la actividad 3

Para este caso, inicialmente cuando el segundo polarizador no se ha rotado y ambos polarizadores les coincide su eje de polarización en la misma dirección podemos encontrar las siguientes situaciones:

- Primer caso

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ Y \end{Bmatrix} \quad |Y\rangle \rightarrow 100\%$$

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ Y \end{Bmatrix} \quad |X\rangle \rightarrow 100\%$$

En el momento en el cual se ha girado el segundo polarizador 90° respecto al primero se tiene que:

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ Y \end{Bmatrix} \quad \rightarrow 0\%$$

Tiene un estado bien definido luego de pasar por el primer polarizador

Es decir que $|X\rangle$ y $|Y\rangle$ son considerados estados de polarización bien definidos.

Basándose en lo anterior y realizando una descripción cuánticamente de la polarización de la luz luego de atravesar los polarizadores. Si establecemos que $\langle 2|1\rangle$ es la amplitud para que la luz que se encuentra inicialmente en el estado 1 llegue al estado 2 al atravesar los polarizadores. Podemos decir: $\langle 2|1\rangle$ es la amplitud para que un fotón que estando en el estado 1 cambie al estado 2. Las situaciones anteriores nos muestran que:

$$\langle Y|Y\rangle = 1$$

Mientras que otra situación nos da

$$\langle X|Y\rangle = 0$$

Del mismo modo

$$\langle X|X\rangle = 1$$

Como nos estamos refiriendo a estados bien definidos de polarización, se establecen cuatro amplitudes de probabilidad posibles las cuales podemos escribirlas como en la figura 4.

$$\begin{array}{cc} & |X\rangle & |Y\rangle \\ \langle X| & 1 & 0 \\ \langle Y| & 0 & 1 \end{array} \qquad \langle i|j\rangle = \delta_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{si } i \neq j \\ 1 & \text{si } i = j \end{cases}$$

Figura 17. Representación matricial de las amplitudes de probabilidad y condición de ortonormalidad

Esta organización en forma de matriz resume los fenómenos que se han estado describiendo con el trabajo con los polarizadores y muestra la condición de ortonormalidad que existe entre estados bien definidos, adicionalmente se evidencia que forman un conjunto de estados de base.

CONCLUSIONES

- Es importante destacar que dentro del contexto de la ciencia la experimentación ha sido una de los aspectos que se encuentran de base, teniendo así un papel relevante en la construcción de teorías. Por lo tanto, es preciso considerar que dentro del contexto de la ciencia en este caso específicamente de la física las actividades experimentales así como la teoría deben considerarse que están al mismo nivel.
- Existen diversos tipos de actividades experimentales, entre las que encontramos la experimentación cualitativa y cuantitativa, se ha llegado a pensar que la primera de ellas al ser menos formal tiene menos importancia que la segunda, pero dentro del contexto de la ciencia se ha observado que en ocasiones las mediciones precisas no desempeñan un papel tan crucial en el momento de establecer nuevas leyes científicas o establecer teorías.
- La perspectiva fenomenología utilizada permite que al momento de realizar una descripción de las actividades experimentales propuestas lo más importante a considerar sean los efectos que se perciben, los cuales son descritos desde la mecánica cuántica debido a que es el sujeto quien decide como interpretar lo que se le está presentando.
- La investigación que se realizó alrededor de los conceptos de estado y principio de superposición condujo a enfatizar la diferencia de su conceptualización alrededor de la mirada clásica y cuántica. Desde el contexto clásico la noción de estado queda caracterizada especificando los observables de posición y momento, mientras que el principio de superposición se toma como la combinación lineal de elementos con las mismas características donde el observador no perturba al sistema de manera apreciable. Por otro lado, desde el contexto cuántico el estado se define especificando el vector de estado y la superposición está ligada a la idea de que el observador al observar el sistema perturba de manera incontrolable dejando el sistema en un estado específico.
- Es posible diseñar actividades experimentales que permite un acercamiento a efectos desde los cuales se pueda hablar de la noción de estado y el principio de superposición de la mecánica cuántica usando elementos de fácil adquisición.

- Se logró extrapolar la simbología que desarrolló Feynman en relación al experimento de Stern- Gerlach, aportando una simbología que permite representar las actividades diseñadas desde las cuales se logran percibir ciertos efectos como es la descomposición de un haz en varios haces, desde los cuales se realiza la explicación entorno a la noción de estado y el principio de superposición desde el contexto de la mecánica cuántica.
- Cuando se quiere realizar la descripción de un fenómeno físico es preciso elaborar una formalización que permita dar cuenta del comportamiento del mismo. La formalización está estrechamente relacionada con la construcción de palabras, dibujos, simbología, proposiciones, entre otras, que permiten dar cuenta del sistema de estudio.

BIBLIOGRAFIA

Ayala Manrique, M. M., Garzón Barrios, M., & Malagón Sánchez, J. F. (2008). Consideraciones sobre la formalización y matematización de los fenómenos físicos. En M. M. Ayala Manrique, Á. E. Romero Chacón, J. F. Malagón Sánchez, O. L. Rodríguez Rodríguez, Y. Aguilar Mosquera, & M. Garzón Barrios, *Los procesos de formalización y el papel de la experiencia en la construcción del conocimiento sobre los fenómenos físicos* (págs. 17-32). Bogotá D.C: Universidad de Antioquia y Universidad Pedagógica Nacional.

Cala Vitery, F., & Eslava, E. (2011). *Mecánica cuántica :sobre su interpretación , historia y filosofía*. Bogotá: Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

Dirac, P. (1967). El principio de superposición. En P. Dirac, *Principios de la mecánica cuántica* (A. Montes, Trad., págs. 15-18). Barcelona, España: Ariel.

Eisberg, R., & Resnick, R. (2006). Física cuántica: ATOMOS, MOLÉCULAS, SÓLIDOS, NUCLEOS Y PARTICULAS. En R. Eisberg, & R. Resnick, *Física cuántica: ATOMOS, MOLÉCULAS, SÓLIDOS, NUCLEOS Y PARTICULAS* (págs. 62-63 y 393-395). México: LIMUSA, S.A.

Fanaro, M. d. (Julio de 2009). La Enseñanza de la Mecánica Cuántica en la Escuela Media (Tesis de Doctorado) . Universidad de Burgos . Burgos .

Ferreiros, J., & Ordoñez, J. (2002). Hacia una filosofía de la experimentación. *CRÍTICA, Revista Hispanoamericana de Filosofía* , 34 (102).

Feynman, R., Leighton, R., & Sands, M. (1989). *Física* (Vol. III). México: Addison Wesley Iberoamericana.

Goded Echevarria, F. (1965). *Mecánica cuántica*. Madrid : Drossat.

Greca, I. A., & Herscovitz, V. E. (2002). Construyendo significados en mecánica cuántica:fundamentación y resultados de una propuesta innovadora para su introducción en el nivel universitario. *ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS* , 20 (2), 327-338.

Hodson, D. (1994). Hacia un Enfoque mas critico del Trabajo de Laboratorio. *Enseñanza de las Ciencias* , 12 (3), 299-313.

Malagón Sánchez, F., Sandoval Osorio, S., & Ayala Manrique, M. M. (2013). La actividad experimental:construccion de fenomenologías y procesos de formalización . *Praxis Filosófica Nueva serie* , 119-138.

Messiah, A. (1965). *Mecánica cuántica* (Vol. I). (C. de Azcárate, & J. Tortella, Trads.) Madrid: Tecnos.

Müller, R., & Wiesner, H. (2002). Teaching quantum mechanics on an introductory level. *American Journal of Physics* , 70 (3), 200-209.

Peña, L. d. (2006). *Introducción a la mecánica cuántica* (Tercera edición ed.). México: Universidad Nacional Autónoma de México: Fondo de Cultura Económica .

Solbes, J., & Sinarcas, V. (2010). Una propuesta para la enseñanza aprendizaje de la física cuántica basada en la investigación en didáctica de las ciencias. *Revista de Enseñanza de la Física* , 23 (1 y 2), 57-84.

Solbes, J., Bernabeu, J., Navarro, J., & Vento, V. (1988). Dificultades en la enseñanza/aprendizaje de la Física Cuántica. *Revista Española de Física* , 2, 22-27.

Spinel Gómez, M. C. (2009). *Introducción a la mecánica cuántica no relativista*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia .

Stephens, A. L., & Clemente, J. J. (2012). The Role of Thought Experiments in Science and Science Learning. (B. J. Fraser, K. G. Tobin, & C. J. McRobbie, Edits.) *Second International Handbook of Science Education* , 1, 157-176.

APENDICE

TRANSFORMACIONES DE BASE

En el capítulo II, se utiliza el ejemplo de la polarización de fotones para hacer referencia a la superposición de estados y en relación a los casos trabajados se encuentran dos conjuntos de estados base, los cuales muestran dos formas diferentes de representar estados bien definidos de polarización que presentan los fotones. A partir de lo anterior, es pertinente mostrar cómo es posible hacer uso de las dos bases si se encuentra una relación entre estas, relación que se puede establecer desde una transformación de base.

Para encontrar la relación entre las bases se parte de la descripción del estado de un fotón dentro dos sistemas coordenados los cuales simboliza la dirección del eje de polarización de los polarizadores (Figura 18). Se puede establecer que en cada uno de los sistemas el estado del fotón queda establecido como:

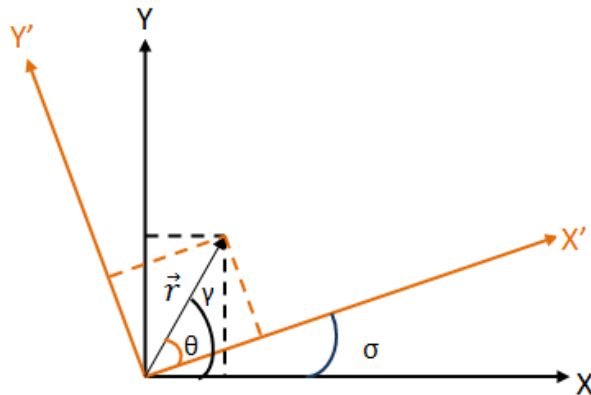


Figura 18. Rotación de un plano (X' , Y'), habían muy pocas personas

SISTEMA 1

$$X = |\vec{r}| \cos \gamma$$

$$Y = |\vec{r}| \sin \gamma$$

Considerando que: $\theta = \gamma - \sigma$

SISTEMA 2

$$X' = |\vec{r}| \cos \theta$$

$$Y' = |\vec{r}| \sin \theta$$

Se puede expresar:

$$X' = |\vec{r}| \cos(\gamma - \sigma)$$

$$Y' = |\vec{r}| \sin(\gamma - \sigma)$$

Resolviendo la identidad trigonométrica de la diferencia de ángulos, tenemos que:

$$X' = |\vec{r}| \cos(\gamma - \sigma)$$

$$Y' = |\vec{r}| \sin(\gamma - \sigma)$$

$$X' = |\vec{r}| (\cos \gamma \cos \sigma + \sin \gamma \sin \sigma)$$

$$Y' = |\vec{r}| (\sin \gamma \cos \sigma - \cos \gamma \sin \sigma)$$

$$X' = |\vec{r}| \cos \gamma \cos \sigma + |\vec{r}| \sin \gamma \sin \sigma$$

$$Y' = |\vec{r}| \sin \gamma \cos \sigma - |\vec{r}| \cos \gamma \sin \sigma$$

$$X' = X \cos \sigma + Y \sin \sigma$$

$$Y' = -X \sin \sigma + Y \cos \sigma$$

En notación cuántica se establece que: $\vec{r} = \varepsilon_0$

Adicionalmente:

SISTEMA 1

SISTEMA 2

$$|X \rangle = \varepsilon_0 \cos \gamma$$

$$|\alpha \rangle = \varepsilon_0 \cos \theta$$

$$|Y \rangle = \varepsilon_0 \sin \gamma$$

$$|\beta \rangle = \varepsilon_0 \sin \theta$$

Lo que quiere decir que los estados $|\alpha \rangle$ y $|\beta \rangle$ se pueden expresar como:

$$|\alpha \rangle = \cos \sigma |X \rangle + \sin \sigma |Y \rangle$$

$$|\beta \rangle = -\sin \sigma |X \rangle + \cos \sigma |Y \rangle$$

Lo anterior representa la forma más general de expresar los estados base que se establecen con los polarizadores rotados en relación con los no rotados.

En el caso particular en el cual la rotación era de 45° se establece que:

$$|\alpha \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|X \rangle + |Y \rangle)$$

$$|\beta\rangle = -\frac{1}{\sqrt{2}}(|X\rangle - |Y\rangle)$$

EXPERIMENTO DE STERN-GERLACH

Se compone de un imán con uno de sus polos en punta y un haz de átomos de plata que atraviesa el campo magnético no uniforme, en el momento que los átomos cruzan el campo magnético se reorienta el momento magnético de cada uno de los átomos (Figura 19).

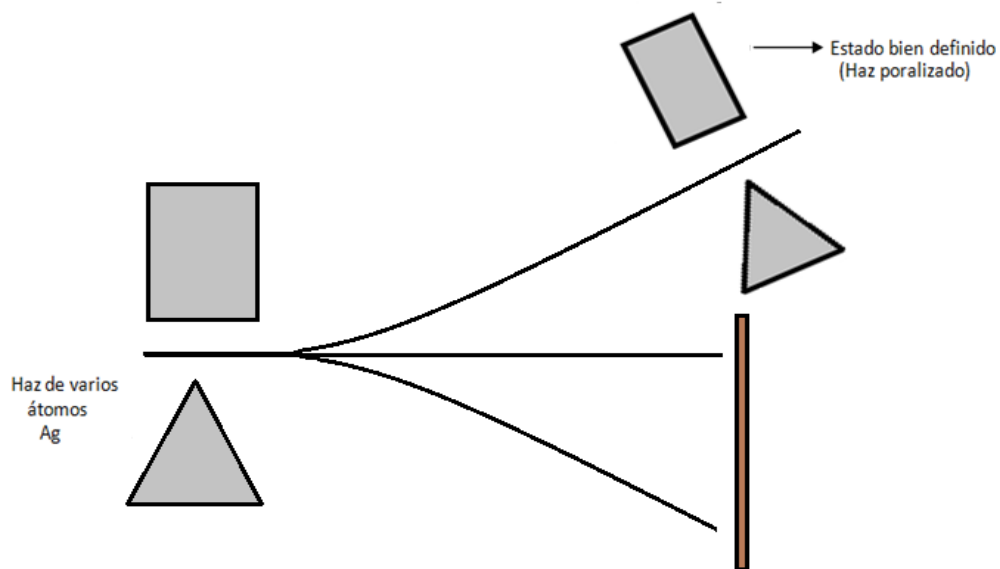


Figura 19. Esquema del aparato de Stern –Gerlach

Representación del experimento de Stern- Gerlach el cual denominaremos S

$$\begin{Bmatrix} + \\ 0 \\ - \end{Bmatrix} \quad \begin{array}{l} | + s \rangle \\ | 0 s \rangle \\ | - s \rangle \end{array} \quad \text{Tres estados del átomo bien definido representa la base}$$

$$\begin{pmatrix} + \\ 0 \\ - \end{pmatrix} \begin{pmatrix} + \\ 0 \\ - \end{pmatrix} \quad | +s \rangle \rightarrow 100\%$$

$$\begin{pmatrix} + \\ 0 \\ - \end{pmatrix} \begin{pmatrix} + \\ 0 \\ - \end{pmatrix} \quad | +s \rangle \rightarrow 100\%$$

$$\begin{pmatrix} + \\ 0 \\ - \end{pmatrix} \begin{pmatrix} + \\ 0 \\ - \end{pmatrix} \quad \rightarrow 0\% \text{ Tiene un estado bien definido en el aparato 1}$$

$$\begin{pmatrix} + \\ 0 \\ - \end{pmatrix} \begin{pmatrix} + \\ 0 \\ - \end{pmatrix} \quad \rightarrow 0\%$$

$$\begin{pmatrix} + \\ 0 \\ - \end{pmatrix} \begin{pmatrix} + \\ 0 \\ - \end{pmatrix} \quad \rightarrow \langle +s | +s \rangle = 1$$

$$\begin{pmatrix} + \\ 0 \\ - \end{pmatrix} \begin{pmatrix} + \\ 0 \\ - \end{pmatrix} \quad \rightarrow \langle +s | -s \rangle = 0$$

$$\begin{pmatrix} + \\ 0 \\ - \end{pmatrix} \begin{pmatrix} + \\ 0 \\ - \end{pmatrix} \quad \rightarrow \langle +s | 0s \rangle = 0$$

$$\begin{pmatrix} + \\ 0 \\ - \end{pmatrix} \begin{pmatrix} + \\ 0 \\ - \end{pmatrix} \quad \rightarrow \langle 0s | -s \rangle = 0$$

Donde $\langle +s | +s \rangle$, es una representación de la amplitud de probabilidad

	$ +s \rangle$	$ 0s \rangle$	$ -s \rangle$	
$\langle +s $	1	0	0	$\langle i j \rangle = \delta_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{si } i \neq j \\ 1 & \text{si } i = j \end{cases}$
$\langle 0s $	0	1	0	
$\langle -s $	0	0	1	

Se puede tener otra situación en el cual se introduce un aparato de Stern- Gerlach, el cual esta rotado con respecto al primero y se reconocerá por la letra **T**

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} + \\ 0 \\ - \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} + \\ 0 \\ - \end{Bmatrix} &\rightarrow \langle -T | +S \rangle \\ \begin{Bmatrix} + \\ 0 \\ - \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} + \\ 0 \\ + \end{Bmatrix} &\rightarrow \langle 0T | +S \rangle \\ \begin{Bmatrix} + \\ 0 \\ - \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} + \\ 0 \\ - \end{Bmatrix} &\rightarrow \langle +T | +S \rangle \end{aligned}$$

	$ +s\rangle$	$ 0s\rangle$	$ -s\rangle$
$\langle +T $	$\langle +T +S\rangle$	$\langle +T 0S\rangle$	$\langle +T -S\rangle$
$\langle 0T $	$\langle 0T +S\rangle$	$\langle 0T 0S\rangle$	$\langle 0T -S\rangle$
$\langle -T $	$\langle -T +S\rangle$	$\langle -T 0S\rangle$	$\langle -T -S\rangle$

Se puede escribir un estado S como una combinación de la base que forma el sistema T.

$$|+S\rangle = C_1|+T\rangle + C_2|0T\rangle + C_3|-T\rangle$$

Para encontrar una de las componentes se puede hallar a partir de la amplitud de probabilidad, por ejemplo:

$$\langle 0T|+S\rangle = C_2$$

Otras situaciones en las cuales se puede utilizar las representaciones del aparato de Stern - Gerlach en donde se evidencie la superposición de estados y mostrar las amplitudes de probabilidades pueden ser como las siguientes, donde se utiliza inicialmente un aparato S, luego un aparato T y por ultimo un aparato igual al primero al cual denominaremos S':

1.

$$\begin{Bmatrix} + \\ 0 \\ - \end{Bmatrix} \xrightarrow{N} \begin{Bmatrix} + \\ 0 \\ - \end{Bmatrix} \xrightarrow{\alpha N} \begin{Bmatrix} + \\ 0 \\ - \end{Bmatrix} \xrightarrow{\beta \alpha N}$$

$$\langle +S'|+S\rangle = \langle +S'|-T\rangle \langle -T|+S\rangle$$

2.

$$\left\{ \begin{array}{c} + \\ 0 \\ - \end{array} \right\} \xrightarrow{N} \left\{ \begin{array}{c} + \\ 0 \\ - \end{array} \right\} \xrightarrow{N} \left\{ \begin{array}{c} + \\ 0 \\ - \end{array} \right\} \rightarrow 0$$

Para este caso si se quisiera saber en qué estado está el sistema se puede bloquear dos canales en el primer aparato S y en el último aparato S', para lo cual tendríamos la siguiente amplitud de probabilidad:

$$\begin{aligned} \langle -S|+S \rangle = & \langle -S'| -T \rangle \langle -T|+S \rangle + \langle -S'| 0T \rangle \langle 0T|+S \rangle + \langle -S'| -T \rangle \\ & \langle -T|+S \rangle = 0 \end{aligned}$$

Otra posible situación con el uso de los aparatos de Stern- Gerlach es la siguiente:

3.

$$\left\{ \begin{array}{c} + \\ 0 \\ - \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{c} + \\ 0 \\ - \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{c} + \\ 0 \\ - \end{array} \right\}$$

$$\begin{aligned} \langle +S'|+S \rangle = & \langle +S'| -T \rangle \langle -T|+S \rangle + \langle +S'| 0T \rangle \langle 0T|+S \rangle + \langle +S'| -T \rangle \\ & \langle -T|+S \rangle = 1 \end{aligned}$$

En el caso de tener dos aparatos, el primero de ellos con las características del aparato S en donde se bloquea dos caminos para dejar solo el estado $|+S\rangle$ y un segundo aparato el cual se denomina **T** con todos los caminos abiertos la probabilidad total se define como:

$$\langle iT|+S \rangle$$

$$P_T = |\langle +T|+S \rangle|^2 + |\langle 0T|+S \rangle|^2 + |\langle -T|+S \rangle|^2 = 1$$