

Mecánica cuántica fundamental, una propuesta didáctica

(Fundamental quantum mechanics, a didactic proposal)

Jhonny Castrillón¹, Olival Freire Jr.², Boris Rodríguez¹

¹Instituto de Física, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

²Instituto de Física, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, Brasil

Recibido em 20/6/2013; Aceito em 6/10/2013; Publicado em 26/2/2014

La mecánica cuántica fundamental (MCF) es una exposición comentada de los experimentos y conceptos fundamentales de la mecánica cuántica, que es la teoría física del dominio cuántico de fenómenos: el principio de superposición y el entrelazamiento cuántico se proponen como el fundamento teórico de la descripción cuántica. De estas nociones base se presenta su formalismo para sistemas de dos niveles. También se exponen las ideas de probabilidad, evolución (dinámica) y medición con el fin de plantear el problema de la medición. Finalmente, esta construcción teórica es contextualizada en experimentos emblemáticos del dominio cuántico: la doble rendija, el experimento de Stern-Gerlach y el interferómetro de Mach-Zehnder, y en aplicaciones tecnológicas, como la teletransportación y la criptografía cuánticas. Además, la MCF es una propuesta didáctica, materializada en seis secuencias didácticas, dirigida a profesores en formación lo mismo que a estudiantes de secundaria.

Palabras-clave: enseñanza de la mecánica cuántica, fundamentos de mecánica cuántica, secuencias didácticas.

Fundamental quantum mechanics (FQM) is a commented presentation of fundamental experiments and concepts of quantum mechanics, the physical theory of the quantum phenomena domain: superposition principle and quantum entanglement become the cornerstone of the theoretical foundation of the quantum description. The formalism of these basic notions, for two-level systems, is presented. Also, the quantum measurement problem is stated through the discussion of the ideas of probability, evolution (dynamics) and measurement. Finally, this theoretical construction is contextualized in emblematic experiments of the quantum domain: the two slit experiment, the Stern-Gerlach experiment and the Mach-Zehnder interferometer, and in technological applications, such as quantum teleportation and quantum cryptography. Besides, the FQM is a pedagogical proposal, formed by six didactic sequences, for high school teachers and students.

Keywords: quantum mechanics teaching, foundations of quantum mechanics, didactic sequences.

1. Introducción

La mecánica cuántica fundamental (MCF) es una propuesta didáctica para la teoría cuántica, dirigida a profesores y estudiantes de secundaria, así como a profesores en formación.² El problema doble que enfrenta la propuesta es (1) presentar la mecánica cuántica (MC) como descripción física del *dominio cuántico de fenómenos* y (2) diseñar materiales didácticos que exhiban los fenómenos cuánticos a la manera de situaciones problema, y que expongan cómo la MC los estudia y

soluciona. El primer momento se refiere al aspecto *disciplinar* o los contenidos a estudiar, y el segundo al *didáctico* o las estrategias a implementar en el aula.³

La enseñanza de la MC introductoria es todavía un campo en formación [1–9]; no obstante, cabe reconocer en las propuestas cuatro rasgos generales conectados, a saber, (1) la elección epistemológica o interpretación que dan a la MC, (2) una perspectiva o acercamiento para abordarla, (3) cierto uso de la historia y la filosofía de las ciencias (HFC) para contextualizar la MC, y (4)

¹E-mail: castrillon.jhonny@gmail.com.

²En general, va dirigida a una audiencia con la alfabetización propia, en matemáticas y geometría, de un estudiante de secundaria. En esta medida puede servir para introducir a estudiantes universitarios de primeros semestres de ciencias e ingeniería, así como a profesionales de cualquier área interesados en la materia. En concreto, se trata de una planeación de lecturas y actividades para un curso de 64 horas, que puede dictarse en un semestre académico de 16 semanas, con intensidad de 4 horas por semana.

³Si bien la propuesta aún no ha sido llevada al aula, razón por la cual no es posible valorar su impacto en los alumnos, la pertinencia de este artículo radica en la justificación que hace de los *contenidos* seleccionados como *fundamentales* para un primer acercamiento a la MC. Así, no se trata tanto de reportar resultados de una pesquisa en *enseñanza de la física*, sino de la presentación de nuevos *productos y materiales didácticos*. En particular, de la manera en que se construyeron secuencias didácticas para algunos de los contenidos modernos de los fundamentos de la mecánica cuántica, y de la planeación de actividades para su estudio, al término del cual se espera que los alumnos adquieran una perspectiva básica de lo que es la física cuántica.

las relaciones que establecen entre física cuántica y física clásica.

En lo que respecta a la MCF, es una propuesta que:

1. Interpreta las entidades cuánticas como sistemas físicos reales plenamente descritos por vectores de estado. La realidad de los sistemas es el conjunto de representaciones que establecen los estados cuánticos con sus cantidades físicas observables, tanto a nivel formal como experimental. Estos estados cuánticos, así mismo, proveen toda la información física relevante de su sistema asociado [10].
2. Ofrece una perspectiva para la MC [11], basada en conceptos fundamentales (superposición y entrelazamiento cuántico), que provee los términos para plantear sus problemas (por ejemplo, el de la medición), así como para comprender sus realizaciones básicas, como las experimentales (experimento de la doble rendija y de Stern-Gerlach, por ejemplo) y algunas aplicaciones de interés moderno (en información cuántica). Todo esto enunciando el significado físico de los objetos matemáticos principales de la MC, a saber, los espacios vectoriales complejos y los operadores lineales.
3. En cuanto al uso de la HFC, abandona el estilo histórico dominante, que inaugura la MC con la radiación de cuerpo negro de Planck, pasa por el efecto fotoeléctrico de Einstein, el modelo atómico de Bohr, y finaliza en la ecuación de Schrödinger; en provecho de una historia crítica [4, 12], que toma como lecciones históricas los trabajos de físicos inconformes con la interpretación estándar de la MC, y que puede ordenarse desde el famoso artículo EPR, pasando por los comentarios que le hizo Bohm, y que encuentra en el teorema de Bell, y en los experimentos que le siguieron, una nueva agenda para los fundamentos de la mecánica cuántica.⁴
4. Por último, relaciona los dominios cuántico y clásico de fenómenos, como coexistentes aunque irreductibles. Esta postura tiene la intención didáctica de enfatizar la nueva física que exhibe el dominio cuántico, que no puede ser descrita en términos clásicos; pero sin olvidar la autonomía del mundo clásico: entre los dominios hay pues una *frontera* y no tanto una *barrera* [14]. En la práctica, y siguiendo las recomendaciones de [9], la propuesta evita lo más posible referencias a conceptos clásicos, como hablar de las propiedades posición (q) y *momentum* (p), es decir, de la

idea de *trayectoria*; o de los modelos de *onda* o *partícula*, que no obstante su eficacia descriptiva de fenómenos clásicos, al día de hoy no hay claridad en cuanto a su estatus en el mundo cuántico.⁵

La siguiente sección es una descripción de los contenidos de la MCF y de cómo son implementados en las secuencias didácticas, usando los criterios previos. La tercera sección resume las seis secuencias que conforman la propuesta. En la sección cuatro se describen en detalle las secuencias sobre superposición y entrelazamiento. Por último, se presentan las perspectivas y conclusiones.

2. El dominio cuántico de fenómenos y su teoría física

En el aula, donde la propuesta es puesta en práctica, los aspectos disciplinares y didácticos son una unidad. Cada disciplina, al menos en lo que tiene de singular, merecería una didáctica ajustada a su problemática. Las secuencias que componen la MCF son pensadas para formular los fundamentos de la mecánica cuántica como un solucionador de problemas. En otras palabras, la misma red de relaciones conceptuales llamada “mecánica cuántica” sirve para comprender fenómenos cuánticos y para aprender a plantear y resolver situaciones problema del dominio cuántico: comprender y aprender, en esta propuesta, son un mismo objetivo.

El dominio cuántico de fenómenos es como un espacio poblado de acontecimientos a los que puede asignarse rasgos cuánticos para su comprensión. La MCF tiene la forma de un relato sobre lo que ocurre en este dominio físico. En primer lugar, sobre cómo los objetos que ahí se encuentran (los sistemas cuánticos) tienen unas maneras de ser (superposición de estados) y unas propiedades medibles (las magnitudes físicas observables), que exigen una nueva intuición para ser comprendidos. Estos objetos son cosas, conocibles en virtud de sus propiedades, pero de una naturaleza sin equivalente clásico. Esta naturaleza cuántica exige el abandono de ciertas maneras clásicas de conocer, y por lo tanto, la elaboración de una intuición cuántica adecuada al ser cuántico de las cosas.

¿Cómo se logra pensar esta novedad? La buena noticia es que las matemáticas (el algoritmo cuántico) se ajustan tan bien a esta intuición, que no sólo dan cuenta de las relaciones posibles entre los objetos y sus propiedades medibles, sino que además revelan otra manera de unir los objetos entre sí y con su entorno (entrelazamiento cuántico).

⁴La propuesta de [13] exhibe otro uso crítico de la historia, muy afín a la MCF, en la que también puede decirse que prima la jerarquía conceptual sobre el orden cronológico.

⁵Veáse por ejemplo la interesante propuesta de [15], y el debate que provocó en [16], [17] y [18].

Avanzando en la descripción cuántica aparece un problema (el problema de la medición): más allá de los retos propios de las matemáticas y de los experimentos, hay una dificultad conceptual en reconciliar dos maneras diferentes en que evolucionan o cambian los sistemas cuánticos (linealidad del algoritmo y no-linealidad del colapso). Así mismo, debates en torno al significado de la MC, como el de la medición, posibilitaron el surgimiento de una nueva ciencia, en la que confluyen la mecánica cuántica y las ciencias de la computación (información cuántica).

Paralela a la construcción del dominio cuántico, la MCF narra la existencia de otro dominio, el clásico, cuyos objetos también tienen estados y propiedades físicas medibles, y una comprensión basada en modelos matemáticos, pero nada de esto resulta problemático porque los estados clásicos, a diferencia de los cuánticos, se ajustan muy bien a la lógica clásica del sentido común. Esta distinción de dominio se aprecia en la incompatibilidad de ciertas propiedades cuánticas, que da origen a las famosas relaciones de indeterminación de dichas propiedades: la imposibilidad fundamental de determinar simultáneamente sus valores en una medición. Este importante resultado y la no-localidad observada en sistemas entrelazados, son evidencias de que la realidad de los sistemas cuánticos es de una naturaleza muy diferente a su contra parte clásica.⁶

Estos son, a grandes rasgos, los contenidos desarrollados en la propuesta. Ahora interesa justificarlos. ¿Por qué estos y no otros? Como guía al lector, la Tabla 1 tiene los títulos y resúmenes de las seis secuencias, cada

una especializada en un concepto o resultado cuántico; pero en referencia directa con las demás.⁷

En la primera secuencia, Superposición, se evidencia la necesidad de este concepto para dar cuenta de los resultados de experimentos que involucran propiedades incompatibles. Pero es solo tras la presentación de su expresión formal que es posible comentar su significado físico, en particular, su función de representar *cualquier* estado cuántico, vía el *principio de superposición*. Para tal fin, en la secuencia Algoritmo, estados y propiedades se modelan, respectivamente, mediante correspondencias con vectores y operadores auto-adjuntos en un espacio de Hilbert. En particular, se estudian sistemas cuánticos de dos niveles, esto es, el espacio de Hilbert de dos dimensiones, y operadores-matrices 2×2 actuando sobre él.⁸ Por otro lado, el uso de las matemáticas le da a la mecánica cuántica uno de los rasgos de su cientificidad: la modelación matemática es esencial en el estudio del dominio cuántico, ante todo porque las correspondencias matemáticas expresan *relaciones* seguras entre las propiedades físicas, lo que permite proponer la teoría física cuántica como la *mejor* descripción posible para el dominio cuántico.

La secuencia Entrelazamiento, por su parte, es una demostración de lo no adecuado de las ideas del realismo local para predecir el entrelazamiento cuántico. Aunque hay referencias a la expresión formal del estado entrelazado, y a su significado, el énfasis de la secuencia consiste en hacer manifiesta la novedad conceptual de este fenómeno.

Tabela 1 - Secuencias didácticas de la MCF.

No.	Título	Palabras Clave
1	Superposición	Propiedad física, Estado cuántico, Sistema cuántico, Incompatibilidad, Indeterminación.
2	Algoritmo	Vector, Operador, Espacio de Hilbert, Correspondencia, Superposición. (Se estudia el caso particular del formalismo para sistemas de dos niveles).
3	Entrelazamiento	Sistemas compuestos, Realismo local, Desigualdad de Bell, No-localidad, Imagen cuántica del mundo.
4	Medición	Probabilidad epistémica y frecuentista, Evolución (lineal) determinista, Evolución no-determinista (Colapso), Determinismo estadístico, Esquema de mediciones cuánticas ideales, El problema de la medición.
5	Experimentos	Doble rendija, Stern-Gerlach, Interferómetro de Mach-Zehnder, "Borrador cuántico."
6	Aplicaciones	La MC como teoría física fundamental, tecnologías de origen cuántico, Información cuántica (criptografía, teletransportación, algoritmo de Deutsch-Jozsa).

⁶Gesche Pospeich [8] declara que la mayoría de las dificultades para comprender la mecánica cuántica están arraigadas en la experiencia cotidiana según la cual los objetos tienen propiedades definidas y en la percepción que las cosas están separadas entre sí y de su entorno. En esta propuesta se muestra lo inadecuado de estas concepciones clásicas, y se da el lugar a la superposición y el entrelazamiento como soluciones cuánticas a estas nuevas maneras de ser y de unirse.

⁷Las versiones íntegras de las seis secuencias, así como sus Lecturas o textos de apoyo correspondientes, conforman un texto completo que recibe el mismo título de este artículo, y que está disponible para el lector mediante comunicación con los autores. Actualmente el documento se encuentra en preparación para publicarlo como un libro de texto.

⁸Si bien los sistemas de dos niveles son los más simples, y esto es una ventaja didáctica, expresan plenamente la naturaleza cuántica; además, su uso generalizado en las investigaciones de Fundamentos de Mecánica Cuántica, ha resultado en que la mayoría de bibliografía disponible en el tema haga referencia explícita a estos sistemas

El entrelazamiento confirma la independencia de los dominios clásico y cuántico, también comentada en la primera secuencia a propósito del principio de indeterminación. Dicha independencia se debe a la irreductibilidad de los fenómenos cuánticos: la nueva física requerida en la comprensión de su comportamiento no puede reducirse a ningún resultado de las teorías previas a la mecánica cuántica. Antes bien, la superposición y el entrelazamiento se presentan como resultados formales (nuevos) que expresan la naturaleza de los sistemas cuánticos, en particular, nuevas maneras de ser y de unirse.

El criterio de predictibilidad para los resultados de mediciones de propiedades en sistemas cuánticos se basa en la noción físico-matemática de *amplitud de probabilidad*. En efecto, concordando con la sugerencia de Michel Paty [19] de extender el significado de probabilidad en el dominio cuántico, esta ya no remite a una *ignorancia* sobre eventos posibles ni solo a una *frecuencia relativa* en experimentos repetidos, sino a una nueva propiedad física. Así, la amplitud de probabilidad que aparece en el estado de superposición expresa que dicho estado es una combinación de *posibilidades físicas*, que puede ser contextualmente actualizado en una medición. Así mismo, aunque en términos netamente instrumentales, Asher Peres [20] acuña la expresión *determinismo estadístico* para caracterizar la predicción en MC: en un prueba cuántica se predicen con *certeza* (aspecto determinista) las *probabilidades* de ocurrencia de los resultados posibles (aspecto estadístico). La MC predice probabilidades, lo que constituye otro rasgo distintivo respecto de las teorías clásicas.

Estas sutilezas conceptuales, tal vez las más controversiales del ideario cuántico, se discuten con algo de detalle en la secuencia Medición, complementando las referencias previas de Paty y Peres con las presentaciones de [13], [21] y [22] sobre el problema de la medición, que formalmente surge de que hay dos tipos de evolución (cambios de estado debido a interacciones) irreconciliables que desarrollan los sistemas cuánticos: la evolución lineal de la ecuación de Schrödinger (en la que superposiciones evolucionan a superposiciones) y el colapso o reducción de estado (en la que una superposición se proyecta a uno de sus estados posibles). Esta doble forma de evolucionar de los sistemas cuánticos encuentra su expresión formal en el *esquema de mediciones cuánticas ideales*, en que se modela la interacción del *sistema* con el *aparato* mediante su entrelazamiento, lo que produce que la naturaleza cuántica del sistema se amplifique al aparato.

En la secuencia Experimentos se describen los montajes experimentales listados (ver Tabla 1), así como el sistema cuántico, la propiedad que quiere determinarse y/o el rasgo cuántico que quiere observarse. Se busca evidenciar que un tratamiento apropiado para comprender la interacción del sistema con el instrumento, y sus resultados, requiere de la estructura conceptual mecánico-cuántico estudiada en las secuencias anteriores: se aplicarán entonces la superposición, el entrelazamiento; la indeterminación, la incompatibilidad y la probabilidad; la evolución lineal y el colapso. En otras palabras, se trata de *ver* en los montajes experimentales lo que se *comprende* en estos conceptos. En segundo lugar, se busca explicitar la equivalencia de estas pruebas cuánticas entre sí: hacer manifiesto que se utiliza el mismo esquema conceptual para comprender el comportamiento de los sistemas, así las pruebas sean diferentes, y que esto es posible, de nuevo, gracias al principio de superposición como representante general del estado cuántico. De este modo podemos ver la mecánica cuántica como el procedimiento intelectual para dar sentido físico a las observaciones experimentales.

La última de las secuencias describe algunas de las Aplicaciones de la MC. Aplicaciones conceptuales y tecnológicas que sirven de criterio de versatilidad del conocimiento cuántico. Primero en la ciencia: la MC sirve para describir una vasta gama de fenómenos a todas las escalas y en diversas áreas de la física, la química y la biología, desde partículas elementales hasta cosmología del universo temprano.⁹ Segundo, se destaca la importancia de la MC para el desarrollo de tecnologías que cambiaron radicalmente el mundo: el transistor y el láser en otros.

Pero la aplicación tecnológica y conceptual central es la de información cuántica. Esta elección tiene que ver con que la hoy establecida área de información cuántica emerge a instancias del prolongado debate iniciado por Einstein y Bohr sobre el significado físico del estado cuántico, y en general sobre la validez descriptiva de la mecánica cuántica. Así vista, la información cuántica es el resultado de una controversia intelectual (científica, pero también filosófica) en la que es posible distinguir la crítica como criterio científico de trabajo: las ideas tienen una historia, son producidas en el seno de una comunidad, son una actividad cultural, y las científicas en particular expresan el pensamiento crítico en su evolución. Es esta crítica justamente la que promueve emergencias y modificaciones en los programas de investigación. En el caso de la información cuántica uno de sus conceptos clave es el entrelazamiento, que fue

⁹A este respecto la secuencia hace eco de la exposición del primer capítulo de [23] sobre la mecánica cuántica como teoría fundamental, y en la que estas aplicaciones son presentadas de una manera accesible a la gran audiencia.

¹⁰Es decir, como un objeto tecnológico, particularmente en el procesamiento de información. A este respecto ver [25] y el capítulo 9 de [13].

concebido inicialmente como una “misteriosa acción a distancia” [24] y que es visto hoy como un *recurso*.¹⁰ Otra razón para la elección de esta “aplicación” es metodológica: a pesar de su sofisticación, formal y experimental, ha habido notables esfuerzos en divulgarla.¹¹

3. Secuencias didácticas

La función de las secuencias es proponer y ordenar una serie de actividades para ser implementadas en el aula, con el objetivo propiciar el aprendizaje de la noción o procedimiento que trata cada una; además, permite hacer seguimiento continuado de este aprendizaje mediante actividades de evaluación: preguntas, ejercicios y problemas. Cada secuencia remite a una Lectura o texto de apoyo que sirve de base para las discusiones y actividades en el aula.

Cada actividad está pensada para realizarse en una hora de aula. En procura de una participación activa del aprendiz, los contenidos han sido presentados a la manera de situaciones problema, en orden ascendente de complejidad, cuya solución es esencial para poder avanzar en el desarrollo de la secuencia, es decir, en el aprendizaje de dichos contenidos. A los aprendices corresponde leer, escribir y exponer, individualmente y en grupo, las situaciones que van encontrando en su exploración del mundo cuántico. Por su parte, el docente propone discusiones a partir de reflexiones que hace de la lectura del texto de apoyo, y presenta las situaciones problema, y los términos para su solución. En ningún caso le corresponde a él resolverlas.

La forma de las secuencias se basa en las *Unidades de Ensino Potencialmente Significativas* (UEPS)¹² ideadas por Marco Moreira. Con todo y que la escritura de las secuencias ha tratado de ser fiel a su filosofía, y en la medida de lo posible implementa sus principios programáticos, no son, propiamente hablando, UEPS. Haría falta un estudio más profundo de sus teorías de aprendizaje subyacentes. En cualquier caso, son aproximaciones a dichas UEPS, y tienen el mismo objetivo de ordenar los contenidos de la materia de enseñanza en provecho de un proceso de aprendizaje exitoso.

De otro lado, las Lecturas son adaptaciones de textos divulgativos o textos guía de mecánica cuántica que se han organizado en secuencias de situaciones problema de complejidad creciente, tratando así de convertirse en materiales de enseñanza.¹³

Por último, la Fig. 1 es un mapa conceptual de la propuesta.

3.1. Superposición

En la sección 4.1. se muestra en detalle esta secuencia didáctica.

3.2. Algoritmo

3.2.1. Objetivo

Estudiar las matemáticas usadas en el algoritmo cuántico, para sistemas de dos niveles, en función de su significado físico. Esto es posible enfatizando que el formalismo expresa ante todo *relaciones* entre conceptos físicos. Si bien es importante ejercitarse en su operatividad, y esto es tenido en cuenta en las actividades propuestas, esa operatividad deviene en aprendizaje toda vez que exprese apropiadamente su sentido físico, que en este caso sirve de base para la “intuición cuántica” pendiente de la secuencia anterior. Por otro lado, el nivel de exposición es el propio de un estudiante de secundaria: el aprendiz no requiere de conocimientos sofisticados para iniciarse en el estudio de la mecánica cuántica.

3.2.2. Descripción

Esta secuencia consta de dos partes, Modelos matemáticos, que tiene siete actividades y Algoritmo cuántico, que tiene cinco, incluida la evaluación final. La primera parte es una presentación de las ideas de vector, espacio vectorial y operador, y sus operaciones principales. Los ejemplos usados, y las actividades propuestas, son en el espacio vectorial *real*, con todo, se comenta el hecho que el espacio general es *complejo*. A medida que van surgiendo nuevas definiciones, se introduce su significado físico, es decir, las correspondencias mediante las cuales es posible expresar el mundo físico con entidades matemáticas. A este respecto, la secuencia inicia con una reflexión del uso que la física hace de las matemáticas: ante todo sirven para expresar relaciones, y no tanto para hacer cuentas, o “resolver ecuaciones”. Esta reflexión es retomada en la segunda parte, donde se establecen con más firmeza las correspondencia que en la primera solo fueron enunciadas. De este modo la superposición encuentra su expresión formal y su significado físico: expresa cualquier estado cuántico en términos de los autoestados de algún operador observable.

Dos referencias claves en la presentación del formalismo cuántico para el nivel deseado fueron [9] y el capítulo 2 de [21].

¹¹En particular, la secuencia hace uso del libro de Anton Zeilinger [26], concebido para exhibir el comportamiento de los fotones a todo público.

¹²www.if.ufrgs.br/~moreira/UEPSport.pdf

¹³Ver nota al pie 7.

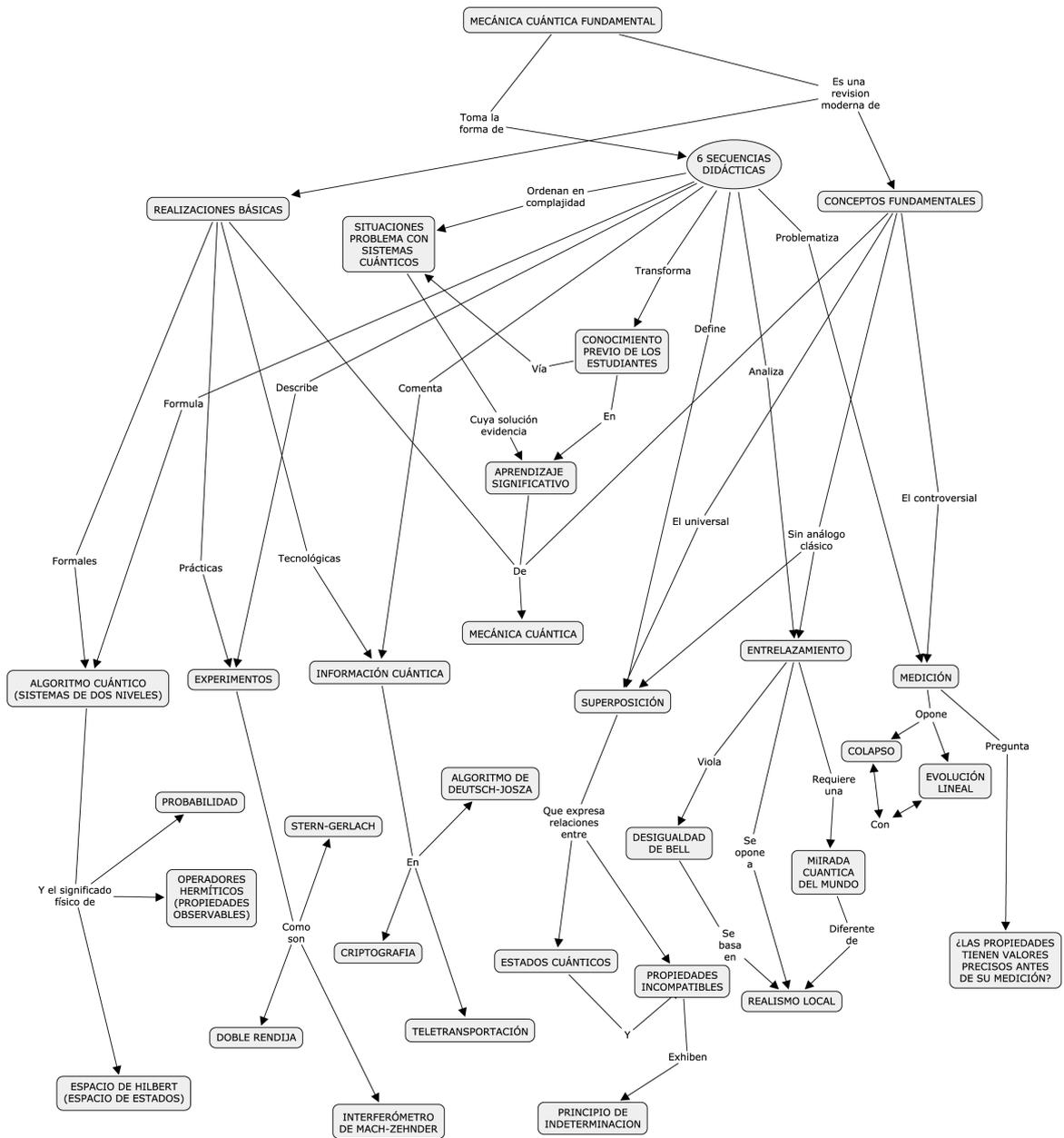


Figura 1 - Mapa conceptual de la MCF.

3.3. Entrelazamiento

En la sección 4.2. se muestra en detalle esta secuencia didáctica.

3.4. Medición

3.4.1. Objetivo

Enunciar el problema de la medición en mecánica cuántica. Interesa particularmente estudiar el vínculo que establecen modelos teóricos y resultados experimentales, y su objetivo común de comprender el mundo físico. Esta manera física de conocer vale tanto para el dominio clásico como para el cuántico, y el proceso general que la riges es la medición. Con todo, la naturaleza

cuántica irreductible al mundo clásico (superposición y entrelazamiento) hace que su proceso de medición descalifique la creencia en que los sistemas físicos poseen propiedades independientes de su observación (medición). Se busca así hacer manifiesto el contraste entre esta percepción infundada, por la experiencia cotidiana, y el *concepto* de medición que hay que comprender en el dominio cuántico.

3.4.2. Descripción

Tanto en física clásica como en mecánica cuántica, el proceso de medición consiste en estudiar la interacción entre el sistema físico (cuyas propiedades quieren medirse) y el aparato de medición. Este estudio comporta

a la vez los aspectos teóricos y experimentales de dicha interacción, cuyo vínculo principal es la verificación de las predicciones del primero en los resultados del segundo. En esta secuencia se proponen lecturas y actividades dirigidas a enfatizar el contraste entre la idea corriente (clásica) de medición, según la cual es un proceso que “revela” el valor de las propiedades medidas (visión a su vez sustentada en la impresión cotidiana que atribuye valores determinados a dichas propiedades), y su contra parte cuántica, que antes de basarse en impresiones cotidianas, se erige como un *concepto*. Para construir este concepto de medición, llamado *esquema de mediciones cuánticas ideales* se revisa primero la idea de probabilidad, identificando la transformación que sufre dicha noción, respecto a los usos que de ella hace la física clásica, cuando aparece como *propiedad física* de los sistemas cuánticos y que es predicha por el principio de superposición. Seguido se presentan los dos tipos de evoluciones cuánticas, a saber, la dinámica lineal de Schrödinger y el colapso de von Neumann, y el conflicto entre ellas, que da lugar al famoso *problema de la medición* en mecánica cuántica. Problema con cuyo planteamiento termina la secuencia, mostrando una nueva perspectiva para apreciar la novedad de los sistemas cuánticos y la descripción que de ellos hace la mecánica cuántica.

3.5. Experimentos

3.5.1. Objetivo

Contextualizar los principios y conceptos cuánticos discutidos en las secuencias anteriores, en cuatro montajes experimentales. En cada uno de ellos se logra identificar el *sistema* y sus *propiedades* de interés, así como el *instrumento de medición* y sus registros, de los que son obtenidos los resultados experimentales. Los experimentos crean las condiciones materiales que permiten *ver* el fenómeno cuántico; pero estas “imágenes” carecen de sentido físico sin el formalismo que deja *leer* dicho fenómeno. Por eso las descripciones ofrecidas de estos experimentos traen también sus expresiones formales. Por último, las correspondencias entre el ver y el leer se logran mediante los conceptos, con los cuales es posible *comprender* el fenómeno: superposición, medición, indeterminación, entrelazamiento, entre otros.

3.5.2. Descripción

La física es una ciencia experimental. Todas sus teorías, la mecánica cuántica incluida, se basan en conceptos cuyo sentido y significado dependen de observaciones o mediciones, o en general, de experimentos. Quizás era esto lo que Asher Peres quería expresar en uno de sus aforismos más famosos: *Los fenómenos cuánticos no ocurren en un espacio de Hilbert, ocurren en un laboratorio*. El texto de apoyo de dichas actividades se

esmera en describir los montajes y resultados de cuatro experimentos fundamentales de la mecánica cuántica: el experimento de la doble rendija, el experimento de Stern-Gerlach, el interferómetro de Mach-Zehnder, y una modificación de este último en el que se observa el fenómeno de borrado cuántico. Todos estos experimentos se realizan sobre una colección grande de *sistemas cuánticos individuales*, o más exactamente, cada experimento consiste en una colección de experimentos idénticos, uno por cada sistema cuántico individual: solo así es posible evidenciar el determinismo estadístico mecánico-cuántico.

3.6. Aplicaciones

3.6.1. Objetivo

Describir usos y tecnologías relacionadas con la mecánica cuántica desde tres perspectivas: la mecánica cuántica como una teoría fundamental, tecnologías de origen cuántico e información cuántica.

3.6.2. Descripción

Las aplicaciones son materializaciones del campo de conocimientos al que remiten. Generalmente, son dispositivos o prácticas con funciones específicas. La mecánica cuántica, cuyos conceptos y experimentos fundamentales han sido estudiados en las actividades pasadas, tiene también una importante colección de aplicaciones, que han modificado para siempre nuestra vida cotidiana y que aspira a seguir transformándola, por ejemplo, con la nueva teoría cuántica de la información. En esta última secuencia de actividades se describen tres diferentes clases de aplicaciones la mecánica cuántica: como herramienta de conocimiento, como recurso para el diseño de dispositivos (el transistor, el láser y la resonancia magnética nuclear en el diagnóstico médico), y como información (criptografía cuántica, teletransportación cuántica y algoritmo de Deutsch-Josza).

4. Superposición y entrelazamiento en detalle

En esta sección se presentan las secuencias didácticas sobre la idea de superposición y el fenómeno de entrelazamiento tal como aparecen en el texto completo de la MCF.¹⁴

4.1. Secuencia didáctica Superposición

Las actividades de esta secuencia son recomendaciones sobre cómo presentar y discutir los contenidos del texto de apoyo, también titulado Superposición (a cada sección en el texto corresponde una actividad en esta secuencia). En el texto hay preguntas y ejercicios que sirven para orientar al aprendiz en la búsqueda de los

¹⁴Ver nota al pie 7.

nuevos conocimientos.¹⁵

El propósito principal de la secuencia es propiciar un aprendizaje significativo del concepto cuántico de superposición, proponiendo situaciones problema, en orden ascendente de complejidad, en las que la superposición aparece como solución o conocimiento de un dominio específico de fenómenos, a saber, el dominio cuántico. Que dicho aprendizaje sea significativo depende de que el aprendiz desee y logre posicionar la superposición en la estructura conceptual llamada “Mecánica Cuántica” como el principio que define los sistemas cuánticos como objetos físicos: entidades a las que es posible asociar un estado cuántico (de superposición) que representa su naturaleza física.

4.1.1. Actividad 1: Bloques lógicos

Esta actividad es sobre la percepción cotidiana según la cual los objetos tienen propiedades fijas, que no dependen, en particular, de su observación. Todavía no es sobre física cuántica, pero sirve para introducir la nueva clase de propiedades que poseen los objetos cuánticos: más precisamente, aquellos rasgos que *no* comparten con los objetos no-cuánticos. Esta distinción de objetos, o mejor, de la naturaleza de los atributos de dichos objetos, sirve a su vez para definir dos mundos o dominios: el clásico y el cuántico, lo cual conducirá, posteriormente, a la necesidad de una teoría física nueva para el cuántico, en la medida que el clásico resulta inadecuado para describirlo. El objetivo de la actividad es acordar con el aprendiz que un objeto físico (los bloques lógicos) puede ser conocido en virtud de sus propiedades (forma, color). Específicamente, por el *valor* de estas propiedades (este es un bloque de forma circular, este es de color rojo). El núcleo de la actividad consiste en realizar una secuencia de tres de “experimentos” con los bloques lógicos:

1. Seleccionar (forma) los bloques que sean circulares y triangulares.
2. Seleccionar (color) los bloques que sean azules y rojos.
3. Seleccionar, por último (forma *y* color), los bloques comunes a las selecciones previas.

Un resultado importante de estos “experimentos” es que las propiedades de los bloques lógicos pueden ser determinadas simultáneamente: este bloque es de forma circular *y* es de color rojo. Resultado técnicamente conocido como *compatibilidad*. Así mismo, selecciones

¹⁵Gran parte del texto de este apoyo es una adaptación del primer capítulo de [21].

¹⁶En este punto de la discusión no se hace referencia al significado del espín ni a sus unidades. El espín funciona como propiedad genérica de los qubits, que a su vez son el nombre genérico de los sistemas de dos niveles.

¹⁷Estos esquemas son simplificaciones de experimentos para determinar los valores de espín (z ó x) de los qubits, solo hacen referencia al *instrumento* que hace la medición y al *sistema* medido, pero no a la *interacción* específica entre ellos. Pero la secuencia Experimentos, justamente, describe dichas interacciones para cuatro montajes diferentes.

adicionales que se hagan del último conjunto muestran que las propiedades de los bloques son fijas: si entre los círculos, por ejemplo, selecciono los rojos, una segunda selección de forma resultará, invariablemente, en que todos son círculos. Convencerse de estos resultados triviales será importante al momento de ejecutar experimentos de selección equivalentes sobre objetos cuánticos: se verá entonces que sus propiedades no cumplen la lógica de atribución de los bloques (ni de ningún objeto clásico en general).

Metodología: exposición del docente, acompañado de bloques lógicos para hacer los “experimentos”. Al final puede mencionarse la existencia de otro mundo, en el que sus objetos también pueden ser conocidos por sus propiedades, pero de comportamiento muy diferente.

4.1.2. Actividad 2: Experimentos con qubits

En esta actividad se definen los sistemas físicos cuánticos que se estudiarán en todo la propuesta: los qubits. El qubit es un sistema cuántico de dos niveles: sus propiedades físicas sólo pueden tomar dos valores. En particular, se estudian las propiedades espín z y espín x , cuyos valores posibles¹⁶ son $+1$ y -1 . El objetivo de la actividad es presentar la naturaleza cuántica de los qubits, a saber, el estado cuántico, a la luz de unos esquemas experimentales con los que se determinan sus propiedades.¹⁷ Por ejemplo, en el análisis de resultados del esquema de la Fig. 2, llamado Complementariedad, se enuncia el *principio de indeterminación*, según el cual no es posible, por razones fundamentales, determinar simultáneamente los valores de propiedades cuánticas incompatibles.

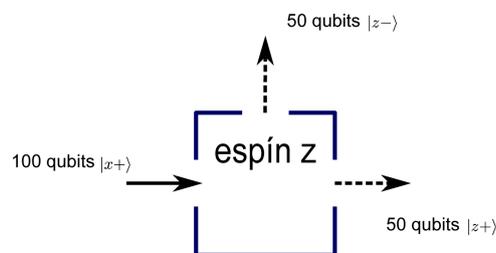


Figura 2 - Propiedades complementarias. No podemos *predecir* con certeza las mediciones espín z de qubits preparados en algún valor de espín x ($|x+\rangle$ en la figura). Sólo podemos *prever* estadísticamente que la mitad de los qubits serán preparados en $|z+\rangle$ y la mitad restante en $|z-\rangle$.

Así mismo, de la secuencia de esquemas de la Fig. 3 se concluye que no es posible asegurar que una propiedad de los qubits permanezca fija cuando *otra* propiedad es determinada: aunque en el primer experimento se establece que los 100 qubits tienen espín $|z+\rangle$, el segundo,

que envía los 50 qubits preparados en $|x+\rangle$ de nuevo a una medición de espín z , borra la determinación inicial, porque el resultado es que *no todos* estos qubits están en $|z+\rangle$. Es decir, un comportamiento muy diferente al que se había encontrado para los objetos clásicos (bloques lógicos). En el análisis de los esquemas experimentales se presenta la ocasión de introducir, sin profundizarlo, el término Probabilidad, como el grado de posibilidad de la ocurrencia de un evento. Los eventos en cuestión son que en un experimento los qubits resulten con uno u otro de los dos valores posibles que se les puede atribuir, esto es, sus dos estados (cuánticos) posibles.

Metodología: tras la exposición del docente, en la que se enfatiza la diferencia de resultados de experimentos equivalentes para cada clase de objetos, cuánticos y clásicos, se pide a los aprendices que listen las diferencias y semejanzas que encuentran de dichos resultados. Y también que traten de “solucionar” la discrepancia. Esto con el fin de motivar la discusión, y para advertirles de una tentativa errónea de solución: que existan otros experimentos posibles que reproduzcan los resultados clásicos. Hay que enfatizar que estos resultados expresan nuevas maneras de ser, y que es por eso que hay que buscar nuevas formas de entenderlos, y que es esto, precisamente de lo que trata la mecánica cuántica. (Experimentos I - V del texto de apoyo).

4.1.3. Actividad 3: Interferómetro de espines

Consiste de una secuencia de cinco esquemas experimentales realizados sobre un interferómetro de qubits. Los experimentos discutidos en la actividad anterior son la base para entender éstos, que aumentan en complejidad. Así mismo, refuerzan lo hallado en los anteriores: que la determinación clásica de propiedades no aplica para describir los resultados de experimentos con sistemas cuánticos (qubits).

Metodología: sea este el momento de enfrentar a los aprendices con las situaciones problema (esquemas experimentales) que se estudian en la actividad, todos los cuales son variaciones del Interferómetro de qubits, descrito en el texto de apoyo. El docente debe limi-

tarse a describir el principio de funcionamiento del interferómetro, y a lo sumo su Calibración. El tiempo restante de la clase será dedicado a los cuatro experimentos propuestos en el texto de apoyo (Experimentos VI - IX). El docente deberá abstenerse de dar respuestas: ahora debe fomentar preguntas.

4.1.4. Actividad 4: Superposición: la manera cuántica de ser

El objetivo de la actividad es conducir al aprendiz a la necesidad de comprender una nueva manera de “ser de las cosas” para los objetos cuánticos: la superposición. En particular, convencerlo de que no hay opciones clásicas para decir de un qubit que es esto o aquello, que es pertinente idear una definición que exprese lo propio de los resultados de los experimentos sobre los qubits, de nuevo, lo que está llamada a proveer la superposición. No obstante, en el espíritu del curso está “naturalizar” lo más posible este y otros contenidos mecánico cuánticos, es decir, promover en el aprendiz una “intuición cuántica” para orientarse en la fenomenología de este dominio físico. Y he aquí que la guía que resulta más conveniente se encuentra en el formalismo matemático cuántico, y esto en virtud de la efectividad de las matemáticas para expresar relaciones abstractas, que es el tipo de relaciones que mejor se ajustan lo que ocurre a los qubits respecto de sus propiedades físicas. Por tal razón la definición “completa” de superposición debe postergarse hasta después de introducir al aprendiz en los rudimentos del formalismo cuántico, que se hace en la secuencia siguiente.

Metodología: la actividad se inicia con la revisión de los resultados esperados por los aprendices de los experimentos de la clase anterior. Con atención especial al Experimento VIII, cuyos resultados sirven para la ejemplificar la superposición, y al mismo tiempo para mostrar su naturaleza cuántica irreducible a cualquier intuición clásica. A este respecto, el párrafo Experimento VIII revisado, en el texto de apoyo, es un análisis de sus resultados en el que se descartan una a una las opciones lógicas clásicas, sugiriendo así la necesidad de una nueva opción para darle sentido a los resultados del experimento: la superposición cuántica.

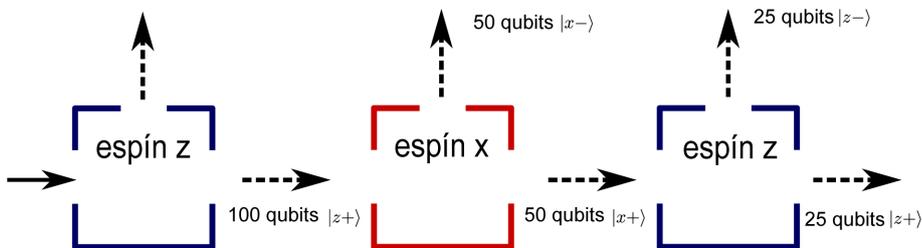


Figura 3 - Medidas secuenciales. Medimos el espín x de 100 qubits inicialmente preparados en $|z+\rangle$. De este resultado, medimos de nuevo el espín z de los qubits $|x+\rangle$. Al medir el espín x se destruye la información $|z+\rangle$ inicial, por eso los resultados de la segunda medición espín z : 25 qubits $|z+\rangle$ y 25 $|z-\rangle$.

4.1.5. Actividad 5: Revisión

Evaluación escrita de los contenidos de las actividades previas. Ver última sección del texto de apoyo.

4.2. Secuencia didáctica Entrelazamiento

Los físicos reportan sus investigaciones en artículos, y su escritura, evaluación y estudio es parte esencial de su trabajo; por lo general son textos de pocas páginas, auto-contenidos, no obstante con referencias a otros artículos o libros. Esta secuencia es una lectura crítica del artículo divulgativo *Entrelazamiento*.¹⁸ Desde el punto de vista didáctico queremos diversificar los materiales de estudio: no solo con libros se aprende. Queremos explotar la riqueza didáctica y comunicativa de los artículos. En cuanto a lo disciplinar, en el fenómeno de entrelazamiento dos sistemas pueden estar tan íntimamente conectados entre sí que la medición de uno instantáneamente cambia el estado cuántico del otro, sin importar cuán separados estén. Como veremos, esta conexión sin equivalente clásico modificó para siempre nuestra imagen del mundo. Hemos complementado el artículo con algunas preguntas, ejercicios y problemas con el fin afianzar las ideas principales de la exposición de Zeilinger.

El objetivo de la secuencia es exponer el fenómeno de entrelazamiento, y el intento fallido del *realismo local* por describirlo. Un aprendizaje significativo de esta noción es posible dotando al aprendiz de las herramientas intelectuales que le permitan apreciar su significado y novedad. Y esto se logra describiendo un esquema experimental donde se observa entrelazamiento y seguido, evidenciando la imposibilidad del realismo local para construir una imagen cuántica del mundo, es decir, para predecir el fenómeno de entrelazamiento. Exponemos entonces las tesis del realismo local, que argumenta que las propiedades de los objetos pre-existen así no las midamos, y que las medidas de objetos distantes no se influyen entre sí. Estas tesis encuentran su expresión formal en la *desigualdad de Bell*, que ejemplificamos con una situación clásica en la cual las tesis del realismo local son “auto-evidentes”. No obstante esta “obviedad” la naturaleza cuántica no cumple la desigualdad de Bell, y por lo tanto, no es posible “visualizarla” en base al realismo local.

4.2.1. Actividad 1: Resumen, Palabras clave e Introducción

Aquí presentamos el fenómeno de entrelazamiento. El artículo inicia describiendo su contexto histórico, en particular, comentando la crítica que los físicos Albert Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen hicieron de

la descripción mecánico cuántica de la realidad: escribieron un artículo, conocido desde entonces como el artículo EPR (por sus iniciales), en el que imaginaron un experimento de entrelazamiento cuyos resultados, tal como son predichos por la mecánica cuántica, estarían en contra de la idea de realidad definida por estos autores. Para la época de la crítica, 1935, no había condiciones experimentales para comprobar su situación física imaginada; pero fue su curiosidad la que motivó investigaciones que en los años 1970 terminaron en experimentos reales, cuyos resultados, a su vez, fueron el germen de la nueva ciencia de información cuántica. Después de la crítica de EPR y antes de los experimentos que dirimieron su objeción, aparece en 1964 un artículo del físico irlandés John Bell en el que deduce una expresión muy simple, *la desigualdad de Bell*, a partir de la cual fue posible idear los experimentos ulteriores.

Metodología: esta es la primera actividad sobre entrelazamiento, entonces hay que hacer un introducción general del tema y del artículo. El docente entrega y presenta el artículo. Primero, definiendo el tema de que trata: fenómeno de entrelazamiento, y su procedencia: Título, Autor, Publicación, Año. Seguido presenta cada una de las partes del artículo: Resumen, Palabras clave, Introducción, los títulos de las secciones y las conclusiones: esta presentación da una idea general del material de estudio para la secuencia. Pero en esta actividad basta con leer cuidadosamente las tres primeras partes, previa descripción, por parte del docente, de sus funciones, a saber:

Resumen Es un breve texto que contiene los objetivos, hipótesis y resultados del artículo.

Palabras clave Son las definiciones o ideas que hay que aprender al final de la lectura, y también sus ideas principales.

Introducción En una presentación general de las hipótesis, resultados y conclusiones más importantes del artículo. También sirve para contextualizar al lector, explicarle el tema y la materia que lo estudia.

Después que los aprendices hayan leído estas tres partes, el docente puede iniciar la discusión, por ejemplo, pidiendo que escriban y/o expongan las Palabras clave tal y como las entendieron.

4.2.2. Actividad 2: Correlaciones perfectas y Einstein, Podolsky, y Rosen

Esta actividad es de fundamentación. Ofrece a los aprendices los *términos* en los cuales se estudia el entrelazamiento. En ese sentido es un *marco teórico*. Además plantea el *problema* de interés: las hipótesis y

¹⁸En realidad se trata de una adaptación del texto *Entanglement, a quantum puzzle for everybody*, de Anton Zeilinger, que aparece en el apéndice de [26].

el esquema experimental donde se observa el fenómeno, ver Fig. 4. En este esquema se describen pares de sistemas (A y B), que son sub-sistemas del “par” proveniente de una fuente (S), y a los que interesa determinar los valores de tres de sus propiedades (x, y, z), cada una con dos valores posibles (+ y -). Las correlaciones perfectas hacen referencia al hecho que cuando en ambos sub-sistemas se mide la misma propiedad, el resultado es siempre el mismo: esto es un tipo de entrelazamiento. Por último, nos presenta un conflicto entre el fenómeno de entrelazamiento, tal y como lo predice la mecánica cuántica, y las ideas de realismo local de EPR.

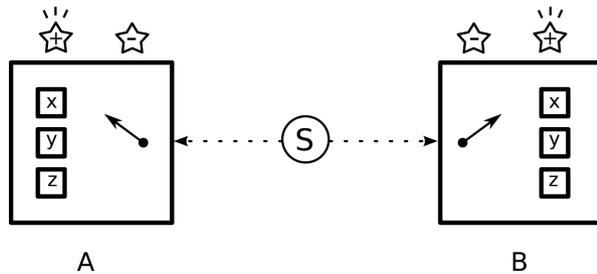


Figura 4 - Montaje para la observación experimental del entrelazamiento. Una fuente S emite pares de sistemas entrelazados. Un sistema es registrado por la estación de medición A, el otro por la estación de medición B. Usando un interruptor en cada estación de medida, los experimentadores pueden decidir qué propiedad, x, y o z, se mide a los respectivos sistemas. Los resultados de la medición para cada posición de los interruptores tiene sólo dos posibilidades, + ó -.

Metodología: tras la lectura de esta sección, los aprendices, en grupos, harán exposiciones del esquema experimental y del modelo del realismo local que pretende explicar dicho experimento. Al final de la sección hay un problema propuesto que puede también trabajarse en grupo.

4.2.3. Actividad 3: Desigualdad de Bell para no-físicos

La *desigualdad de Bell* permite hacer predicciones de modelos que se basan en las hipótesis del realismo local. En esta sección deducimos dichas predicciones para una situación clásica en la que interesa establecer proporciones entre observaciones de características de una muestra de gemelos idénticos. En particular, tres características (de dos valores) que son, color de ojos (azules o negros), de cabello (pelinegros o rubios), y altura (altos o bajos): estas son las *propiedades* de los gemelos como *sistemas clásicos*. La desigualdad así obtenida es traducida a los pares de sistemas entrelazados del esquema experimental de la actividad anterior, así que tenemos una predicción clásica (realismo local) para sistemas entrelazados. En cuanto a lo didáctico, esta parte del artículo es la descripción de un modelo para predecir, clásicamente, un fenómeno. No

hay referencias directas a la mecánica cuántica, porque lo que interesa es buscar una predicción alternativa a dicha teoría, que recordemos, está en conflicto con las hipótesis del realismo local.

Metodología: la deducción de la desigualdad de Bell para los gemelos idénticos, y su ulterior traducción a sistemas entrelazados, requiere de unas operaciones básicas, suma y comparación de conjuntos. El artículo expone dicha deducción en forma con ecuaciones simples y con gráficas. Al final de la sección hay un ejercicio que sirve para evaluar la recepción de la desigualdad de Bell en los aprendices.

4.2.4. Actividad 4: Fotones entrelazados

En la sección pasada obtuvimos la *desigualdad de Bell para sistemas entrelazados*, en esta se particulariza lo anterior para el caso de fotones entrelazados. Así mismo, la situación experimental de la sección II es traducida al caso de los fotones, donde sus propiedades son la polarización en tres direcciones perpendiculares.¹⁹ La sección termina entonces con la *desigualdad de Bell para fotones entrelazados*, y con dos preguntas muy importantes (1) ¿qué predice la mecánica cuántica de dichos fotones? La respuesta es que predice algo *diferente* a la *desigualdad* y (2) ¿cuál modelo (el de la mecánica cuántica o el del realismo local) es el que mejor se ajusta a los resultados experimentales? La naturaleza se decide por la mecánica cuántica.²⁰

Metodología: este es el punto clave de todo el artículo. Muestra que las ideas aparentemente obvias del realismo local no son válidas en el mundo cuántico. Tras la exposición del docente, éste debe propiciar la discusión, por ejemplo, preguntando a los aprendices cuál es el conflicto del final de la sección, y qué es lo que ocurre en el experimento.

4.2.5. Actividad 5: Conclusiones

La interpretación de este conflicto entre el realismo local y el entrelazamiento cuántico aún es un problema abierto. En esta sección se especula sobre las posibles fallas del realismo local, y sobre las consecuencias filosóficas de dicha falla. La pregunta guía es entonces, ¿la MC es no-local y no-realista? En cualquier caso, la MC requiere una nueva imagen del mundo, y la discusión previa provee los términos para captar esta necesidad.

Metodología: la exposición del docente debe caracterizar y diferenciar las tres diferentes “imágenes del mundo” disponibles tras el ocaso del realismo local, que

¹⁹Se trata del caso de las tres direcciones de polarización que exhiben complementariedad máxima, cada una con dos valores posibles.

²⁰Es importante aclarar que no se hace el desarrollo formal de la predicción mecánico-cuántico que viola la desigualdad. Lo importante a este nivel es mostrar dicha violación de la desigualdad, y el hecho que los experimentos confirman la predicción cuántica.

de acuerdo con Zeilinger [26] son: (1) La realidad depende de nosotros: un objeto es real después que lo medimos, no antes, (2) el determinismo total: incluso nuestra supuesta libertad de elegir qué mediciones realizar está predeterminada, y (3) El espacio y tiempo tienen otro significado diferente al que pensamos. Un buena idea es invitar a los aprendices a que tomen partido por alguna de las opciones y traten de argumentar su defensa.

5. Perspectivas y conclusiones

La enseñanza de la mecánica cuántica es un campo en formación, con todo, las propuestas de su implementación deben tener en cuenta el estado controversial de esta teoría, en sus conceptos y consecuencias, su gran variedad de aplicaciones y su porvenir tecnológico. En este texto se justifican los contenidos de la MCF, que presenta los fenómenos cuánticos como un dominio físico problemático, y recurre a su teoría, esto es, la mecánica cuántica, como fuente de los conceptos fundamentales a partir de los cuales se encuentran soluciones a tales problemas.

Los dos pilares de la propuesta son los conceptos de superposición y entrelazamiento, la nueva física que expresan, y su formalismo en el caso de los sistemas más simples. En esto consisten las tres primeras secuencias, las tres restantes pueden ser vistas como consecuencias y aplicaciones de estos fundamentos conceptuales.

El aula de física está en crisis. Entre otras cosas porque hay un desfase entre los contenidos ofrecidos y las investigaciones más activas de esta ciencia, y sus tecnologías derivadas, también las que más incidencia tienen en la vida moderna. Deliberadamente, se está excluyendo a los jóvenes de secundaria de esta actividad cultural interesante y productiva. La mecánica cuántica es una teoría fundamental presente en la cultura científica, tecnológica y filosófica actual, es un ejemplo del quehacer científico contemporáneo. De nada sirve repetir la infundada creencia según la cual no es posible ofrecerla al público no-científico: no es menos abstracta ni menos “difícil” que cualquier otra teoría física, acaso sí más fundamental y acorde al estado actual del pensamiento científico. El tiempo de presentarla a los jóvenes en formación es ahora, ésta es la motivación para presentar esta primer entrega, y las por venir, de la MCF.

Referencias

- [1] I.M. Greca e M.A. Moreira, *Investigações em Ensino de Ciências* **6**, 29 (2001).
- [2] F. Ostermann e M.A. Moreira, *Investigações em Ensino de Ciências* **5**, 23 (2000).
- [3] A. Pereira e F. Ostermann, *Investigações em Ensino de Ciências* **14**, 393 (2009).
- [4] I.M. Graca and O. Freire Jr, in *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching*, editado por M.R. Matthews (Springer, Berlin, 2014).
- [5] I.M. Graca and O. Freire Jr, *Science & Education* **12**, 541 (2003).
- [6] I.M. Graca e O. Freire Jr, in *Teoria Quântica: estudos históricos e implicações culturais*, editado por O. Pessoa, J.L. Bromberg e O. Freire Jr (eduepb, Paraíba, 2010).
- [7] G. Pospiech, in *Research in Science Education: Past, Present and Future* editado por H. Behrendt, H. Dahncke et al. (Springer, Berlin, 2001).
- [8] G. Pospiech and M. Michelini, in *Conference Frontiers of Physics Education*, Opatija, 2007, editado por R. Jurdana-Šepić et al. (Udruga, Croatia, 2008), p. 85.
- [9] G. Pospiech, *Physics Education* **34**, 311 (1999).
- [10] M. Paty, *European Journal of Physics* **20**, 373 (1999).
- [11] J. Castrillón, in *Teoria Quântica: estudos históricos e implicações culturais*, editado por O. Pessoa, J.L. Bromberg e O. Freire Jr (eduepb, Paraíba, 2010).
- [12] O. Freire Jr, *Studies In History and Philosophy of Science Part B: Studies In History and Philosophy of Modern Physics* **40**, 280 (2009).
- [13] G. Greenstein and A. Zajonc, *The quantum challenge: modern research on the foundations of quantum mechanics* (Jones and Bartlett Publishers, Sudbury, 2006), 2nd ed.
- [14] M. Paty, *Synthese* **125**, 179 (2000).
- [15] A. Hobson, *American Journal of Physics* **81**, 211 (2013).
- [16] R.J. Sciamanda, *American Journal of Physics* **81**, 645 (2013).
- [17] M. Sassoli de Bianchi, *American Journal of Physics* **81**, 707 (2013).
- [18] M. Nauenberg, *American Journal of Physics* **81**, 708 (2013).
- [19] M. Paty, in *Stochastic Causality*, editado por M.C. Galavotti, P. Suppes and D. Costantini (Center for Studies on Language and Information, Stanford, 2001).
- [20] A. Peres, *Quantum Theory, Concepts and Methods* (Klewer, New York, 2002).
- [21] D. Albert, *Quantum Mechanics and Experience* (Harvard University Press, Cambridge, 1992).
- [22] C. Isham, *Lectures on Quantum Theory: Mathematical and Structural Foundations* (Imperial College Press, London, 1995).
- [23] S. Haroche and J.M. Raimond, *Exploring the Quantum: Atoms, Cavities and Photons* (Oxford University Press, New York, 2006).
- [24] A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen, *Physical Review* **47**, 777 (1935).
- [25] C.P. Yeang, *Annals of Science* **68**, 325 (2011).
- [26] A. Zeilinger, *Dance of the photons: from Einstein to quantum teleportation* (Farrar, Straus and Giroux, New York, 2010).