
¿ES POSIBLE HACER COMPRENSIBLE LA MECÁNICA CUÁNTICA?

ILEANA MARÍA GRECA

Instituto de Física. UFRGS. Campus do Vale. Caixa Postal 15051. CEP: 91501-970. Porto Alegre, Brasil.

RESUMEN

A pesar de ser casi un lugar común en los últimos años la afirmación de que es necesario introducir a los estudiantes secundarios y universitarios en el "espíritu" de la Mecánica Cuántica lo antes posible, la mayoría de los cursos que se ofrecen tanto a los futuros profesores como a los futuros científicos no discuten sus aspectos esenciales. Este artículo intenta argumentar en favor de un abordaje de enseñanza bastante distinto, en el que se destaque, usando una terminología vigostkiana, la interpretación de sus signos en lugar de la utilización ciega de sus instrumentos.

ABSTRACT

In spite of the claim that today it's necessary to introduce secondary and college students as soon as possible in the "soul" of Quantum Mechanics, most of the introductory courses offered to both future teachers and future scientists do not discuss its essential aspects. The present article try to argue in favour of a quite different approach where the core would be, in vigostkian language, the interpretation of the signs of Quantum Mechanics instead of the blind use of its instruments.

INTRODUCCIÓN.

La necesidad de incluir tópicos de Física Moderna y Contemporánea, y en consecuencia de Mecánica Cuántica (M.C.), en los currículos de Ciencias se ha convertido en una afirmación casi constante en los últimos años.

Las reformas curriculares en varios países (por ejemplo, España y Argentina) proponen que estos tópicos sean estudiados ya en la escuela secundaria. En los Estados Unidos, la discusión se centraliza no en si **deben** ser enseñados, sino en **cómo** hacerlo, sobretodo en los cursos introductorios de Física de las distintas carreras universitarias. El IUPP (Introductory University Physics Project) considera al respecto que los conceptos principales de la M.C. no deben ser sencillamente "sumados" al curso tradicional, en el que se discute básicamente la Mecánica Clásica y el Electromagnetismo, sino que deben permear naturalmente todo el curso introducto-

rio, permitiéndoles a los estudiantes familiarizarse con la "gramática elemental y el vocabulario de la Mecánica Cuántica" (Merzbacher, 1990).

Como indica Hobson (1996, p.203), esta necesidad surge del hecho de que la M.C., además de ser una de las más exitosas teorías científicas por la amplia variedad de fenómenos que describe y predice, tiene impactos prácticos que afectan la mayor parte de las tecnologías de la información y de la comunicación. Ésto sin olvidarnos que es la base de sustentación de toda la Física Moderna, sea la nuclear, el estado sólido, las partículas elementales y la luz, así como de la Química moderna y de parte de la Biología.

Sin embargo, los contenidos de las disciplinas introductorias sobre el asunto (Introducción a la Física Moderna, Introducción

a la Mecánica Cuántica o Mecánica Cuántica I) que son, por lo menos en Brasil¹, las asignaturas más frecuentes que al respecto se les proporciona a los futuros profesores de Física de la escuela secundaria, no acompañan este movimiento. Estos cursos, como se verá a continuación, no enfatizan los aspectos fundamentales de la M.C. que hacen con que sea una forma de ver el mundo microscópico radicalmente diferente de la Física Clásica. Este problema, por otra parte, no es exclusivo de los cursos de formación de profesores, sino que también está presente en los cursos de formación de los científicos en general, en los cuales el enfoque instrumental de la M.C. enmascara aspectos esenciales de la mayor revolución científica de la historia de la Ciencia, por sus alcances. Este tipo de tratamiento contribuye a hacer de la M.C. "esa misteriosa, confusa disciplina que nadie realmente comprende, pero que sabemos como usar" (Gell-Mann, 1981).

En este trabajo intentaremos aportar argumentos a favor de un abordaje de la enseñanza básica de la M.C., en el que se acentúe, utilizando términos vigostkianos, la interpretación de sus signos en lugar de la utilización ciega de sus instrumentos.

LA MECÁNICA CUÁNTICA DEL CURSO DE INTRODUCCIÓN.

En contraste con otras asignaturas de Física Clásica, como la de Mecánica o la de Electromagnetismo, las disciplinas de Introducción a la M.C. empiezan casi siempre por una "perspectiva histórica": una serie de hechos experimentales (radiación de cuerpo negro, efecto fotoeléctrico, efecto Compton, rayos X, espectros de emisión), es presentada cronológicamente con el objetivo didáctico de persuadir a los estudiantes que la cuantización de la energía es una conclusión "óbvia" a la que se llegó racionalmente como consecuencia de esos experimentos². A continuación son discutidos los distintos modelos atómicos, enfatizando especialmente el modelo del átomo de Bohr, superado hace ya más de 70 años. Esta introduc-

ción no sólo no es correcta desde el punto de vista histórico³ -Kragh (1992), por ejemplo, denomina estas versiones estandarizadas de "casi-historia", destacando los errores y los mitos que las mismas contienen, como en el caso del relato del efecto fotoeléctrico-, sino que además fortalece concepciones físicas clásicas, dificultando la comprensión de la M.C..

Para presentar un par de ejemplos, en un seguimiento realizado en un curso de M.C. I (Greca & Moreira, en preparación) fue posible observar que varias de las experiencias citadas anteriormente pueden ser entendidas como énfasis a los aspectos ondulatorios de la M. C., lo que es "reforzado" en la presentación de la ecuación de onda de Schrödinger. Bajo esa perspectiva, o sea, suponiendo que para los estudiantes la M.C. estaba reducida a una versión ondulatoria, ha sido posible entender la razón de muchos de los errores que ocurrían en los exámenes, así como las preguntas que los estudiantes realizaban durante las clases.

El caso del modelo del átomo de Bohr es otro ejemplo significativo. Se supone que este modelo, dada su capacidad de descripción y de "ilustratividad", puede ser fácilmente comprendido, además de usarse, hasta hoy, para explicar, por ejemplo, observaciones astronómicas. Sin embargo, esa "ilustratividad" dificulta la comprensión de aspectos básicos de la materia en la asignatura: ¿cómo convencer a los alumnos que ni siempre se puede hablar en M. C. de trayectorias definidas, si las hemos introducido al presentar el modelo de Bohr y le dedicamos a este tema un período prolongado de tiempo? . En efecto, los resultados de varias investigaciones muestran que los alumnos a los que les ha sido planteada la "eficiencia" del átomo de Bohr, con sus órbitas planetarias, difícilmente abandonan esa imagen semiclassical⁴ (Fischler & Lichtfeld, 1992; Hobson, 1996, Greca & Moreira, 1999).

Luego de la introducción histórica, estos cursos siguen con el formalismo matemático de la teoría, presentando los principios de complementariedad y de incerteza, prácticamente sin discusión. Las cuestiones interpretacionales, que son justamente los puntos de separación de la teoría cuántica respecto de una visión clásica del mundo, no son profundizadas. Así, el problema de la medida, con el colapso de la función de

¹ En algunos casos, temas vinculados a la Física Moderna son analizados en asignaturas de "Seminarios".

² Excepciones a esa "regla" son las propuestas de las "Feynman's Lectures" (1966) y del "Berkeley Physics Course" (1971), propuestas que, sin embargo, no son generalmente utilizadas en estas asignaturas.

³ Esta presentación induce, además, una visión puramente "empirista" de la ciencia.

⁴ Esta parece ser la imagen predominante entre los químicos (Galiuzzi et al., 1997).

onda, el indeterminismo cuántico y las peculiares probabilidades o el problema de la no localidad⁵, en la que acciones en un punto pueden tener consecuencias en otro punto distante sin la mediación de ningún mecanismo, no son analizados. Las paradojas de la M.C., como la propuesta por Einstein, Podolsky y Rosen (EPR) en 1935 o el gato de Schrödinger (1935), que desde su surgimiento han incentivado el debate acerca de las limitaciones que el formalismo de la mecánica cuántica imponía a una visión "realista" del mundo, no son muchas veces siquiera mencionadas⁶. Para los que cursan carreras científicas, las asignaturas posteriores, más avanzadas, estarán centradas en el formalismo matemático de la teoría, haciendo con que los estudiantes estén, en general, poco preparados para una discusión conceptual (Barretto, 1994). El resultado de este abordaje es que los alumnos llegan a la conclusión de que no hay nada para ser entendido (Dyson 1958, apud. Barretto, 1994). En suma, pueden haberse quedado con una imagen clásica, pueden haber percibido la presencia de elementos "diferentes", en cuyo caso la M.C. se reduce a un enigma o a un milagro, o pueden haber adoptado la visión que, según Schreiber (1994) parece la preferida entre físicos y estudiantes, la pragmática: la Mecánica Cuántica es una herramienta poderosa, que no necesita ser comprendida.

MODELOS MENTALES Y COMPRENSIÓN DE LA FÍSICA.

Ahora bien, ¿qué significaría "comprender" en Mecánica Cuántica?. Si seguimos la propuesta de Schenzle (1996, p.319), la comprensión en un determinado campo de la Física es alcanzada cuando somos capaces de predecir un proceso físico sin tener que consultar previamente la teoría formal con su aparato matemático⁷. Supongamos que, en principio, esto sea válido tanto para la Física Clásica como para la menos

"intuitiva" Cuántica. Esta definición equivale a decir, según la Teoría de los Modelos Mentales, que fue posible formar un modelo mental del fenómeno (Greca & Moreira, 1997).

Según Johnson-Laird (1983) la capacidad para influenciar, controlar, iniciar o predecir un fenómeno físico, que está en la base de su comprensión, resulta de la construcción de modelos de trabajo de ese fenómeno. En esta teoría, los modelos son representaciones análogo-estructurales de la realidad. Frente a una dada situación, tanto los elementos elegidos para interpretarla, como las relaciones percibidas o imaginadas entre ellos, determinan una representación interna que actúa como "sustituto" de tal realidad. Manipulando esos sustitutos, ciertas propiedades del sistema, así como algunas relaciones no implícitas, pueden ser "leídas" directamente⁸, facilitando la realización de inferencias y de predicciones. Por ejemplo, en la interpretación de los fenómenos cotidianos, varias investigaciones señalan que los modelos mentales que construimos para esa interpretación incluyen relaciones causales simples entre los elementos percibidos de la situación en cuestión. Dichas relaciones causales están basadas en tres principios generales: en el dominio determinista todos los eventos tienen causa, las causas preceden a los eventos y la acción sobre un objeto es la principal causa para cualquier cambio que ocurra en él (Johnson-Laird, 1983).

Parece claro que los instrumentos de la M.C. -su formalismo matemático- no garantizan por sí solos la construcción de modelos mentales en los que los conceptos sean "comprensibles" -por lo menos según la definición que presentamos al inicio de esta sección. La razón para esto es que el formalismo es "semánticamente" ciego: se puede operar con él de manera eficiente sin "comprender" de que se trata. Sin embargo, cabe preguntarse si la propia definición de comprensión que hemos dado tiene significado en M. C. ¿Será posible generar sustitutos de la realidad en donde sean incluidos conceptos tan poco "realistas" como el de la no localidad o el indeterminismo? ¿Esta capacidad de construir análogos estructurales no envolvería procesos de visualización (clásicos) que, de hecho, estarían contra esta "poco intuitiva" teoría? ¿Es posible "imaginar" propiedades en el espacio de Hilbert, sin pensar en un espacio geométrico euclideo? ¿Cómo realizar predicciones físicas de una

⁵ Los fantásticos efectos no locales están ahora bien establecidos teóricamente y experimentalmente, pero no son generalmente conocidos ni por los propios físicos (Hobson, 1996).

⁶ Hoy, además, están en el centro de desenvolvimientos tecnológicos de punta: los estados correlacionados de la paradoja EPR son la base de la teleportación cuántica y la superposición de estados de la paradoja del gato de Schrodinger es esencial para la computación cuántica.

⁷ Parecería que en algunos casos los físicos teóricos más abstractos son capaces de "leer" en el formalismo matemático (Greca y Moreira, 1996).

⁸ Esta particularidad de la teoría de modelos mentales responde bien a las características del razonamiento humano (Johnson-Laird & Byrne, 1991).

teoría en la cual los resultados físicos no son derivados de un modelo de universo sino de un constructo matemático abstracto como la ecuación de Schrödinger? Si, como se indicó antes, algunas "visualizaciones" pueden llevar a problemas de comprensión generando versiones "clásicas" de la M.C., ¿no será preferible entonces trabajar sólo con sus instrumentos matemáticos, sin intentar comprenderla?

En general consideramos como "intuitivo" el concepto o la idea con la cual estamos acostumbrados, o sea, aquello con lo que estamos acostumbrados termina por transformarse en "intuición". Es decir, las cuestiones con las cuales nuestra imaginación puede lidiar, las representaciones que puede generar, y muchas de las cosas que nos parecen naturales, o hasta obvias, no son en general resultado de una comprensión más profunda, sino de "costumbre", de familiaridad. Por ejemplo, nuestra particular concepción del espacio, que nos permite identificarlo como real, euclideo y tridimensional, debe ser entendida como siendo el formato espacial del que estamos "convencidos" pues con esa concepción evolucionaron nuestros cerebros (Cairns-Smith, 1996), y no como el formato "real". Esta concepción no nos impide de "imaginar" espacios de más de tres dimensiones o espacios con métrica no euclidea, que para algunas personas son tan "intuitivos" como el espacio que llamamos de "real".

Tampoco nuestra intuición física clásica es tan intuitiva, como se puede comprobar de las dificultades que enfrentan los estudiantes con los distintos conceptos físicos clásicos. Por ejemplo, nuestro sistema cognitivo trabaja normalmente con relaciones causales lineales. En el caso del concepto de fuerza ésto se traduce en la existencia de un agente que provoca el movimiento, de tal forma que cuando un cuerpo está moviéndose, siempre existe una fuerza que lo causa. Las "visualizaciones" están condicionadas además por la experiencia cotidiana de vivir en un mundo con rozamiento. Según los resultados de una investigación con estudiantes universitarios (Greca & Mallmann, 1997) ésta es la mayor dificultad que enfrentaban estos estudiantes para generar modelos mentales que les permitiesen comprender la Mecánica Newtoniana: para conseguir comprender los conceptos mecano-clásicos debían generar modelos mentales del concepto de fuerza, donde ésta sea vista como una interacción. Como el concepto de fuerza como interacción no es explícitamente discutido en los cursos (y en los libros) introductorios de Física, parecería que

los alumnos, en general, no consiguen aprehenderlo, permaneciendo con concepciones no newtonianas. Los innúmeros resultados de las investigaciones sobre concepciones alternativas son una prueba de ello. La "intuición" mecano-clásica correcta sólo se obtiene, a duras penas, después de varios cursos y de bastante reflexión.

Parecería entonces que, aun no siendo una tarea fácil, es posible crear mecanismos internos que nos permitan la construcción de modelos mentales de mundos donde, por ejemplo, la Mecánica Clásica sea válida. Dichos modelos mentales, que nos llevan a entenderla, son tales que si bien no podemos "imaginar" la realidad, podemos por lo menos tratar de imaginar un modelo que sea sistemáticamente como ella.

Si ésto sucede con la Mecánica Clásica, se puede pensar que procedimientos similares podrían generarse para la comprensión de la M.C.. Aquí hay, sin embargo, una complicación adicional: los conceptos de Física Clásica aunque sean, a veces, sólo implícitamente dados, son los únicos que encontramos en el currículo normal de la escuela secundaria, además de ocupar, como mínimo, el 60% de la carga horaria de disciplinas de Física en un curso de formación de físicos y más del 80% de un curso de formación de profesores de Física⁹. Como queda poco tiempo para la M.C., consideramos que aquellas características que la hacen una forma distinta de entender el mundo deben ser introducidas y discutidas explícitamente para favorecer la construcción de modelos mentales de mundos posibles en donde esa mecánica tenga validez. Esto parecería exigir, según lo que hemos señalado hasta ahora, una mayor dedicación a las discusiones conceptuales. De no hacerlo, parecería poco probable que quienes acompañan sólo uno o dos cursos de M. C. puedan llegar a comprenderla, dado el alto costo, en términos de tiempo, que implica recrear nuestra intuición, cuando los conceptos son sólo implícitos.

A MODO DE EJEMPLO.

Una posibilidad para favorecer la discusión conceptual de la M.C. puede ser la de recurrir al

⁹ Fue tomada como base el curso de Licenciatura del IF-UFRGS, Brasil, de 8 semestres de duración, con los dos últimos con disciplinas a elección. Para aquellos que no elijan disciplinas más ligadas a la Mecánica Cuántica, el peso de disciplinas "clásicas" aumenta considerablemente.

mayor número de ejemplos considerados anteriormente como polémicos, o sea, a los experimentos que fueron cruciales para derrumbar prejuicios clásicos y a las paradojas de la M. C. (Greca & Herscovitz, 2000). Éso permitiría fortalecer conceptos y argumentos cuánticos que en el pasado han sido cuestionados. En los últimos diez o quince años los desarrollos tecnológicos obtenidos, sobre todo en el área experimental de la óptica cuántica y de la electrodinámica de cavidades, han permitido verificar de forma casi directa los fundamentos de la M.C. En este grupo están las experiencias con átomos aislados, almacenados en trampas de cuadrupolos eléctricos o magnéticos que interactúan solamente con unos pocos fotones (Schenzle, 1997). Las experiencias con átomos aislados son conceptualmente simples y más palpables que las experiencias y los "gedanken experiments" utilizados en los libros y cursos usuales, permitiendo profundizar aspectos cuánticos que antes podían pasar inadvertidos, encubiertos por largos desarrollos matemáticos o por experimentos con un número mayor de sistemas. Estas experiencias han dado origen a una generación de físicos para los cuales la experimentación con objetos cuánticos individuales es parte del cotidiano y que han obtenido una "comprensión natural e intuitiva de los fenómenos cuánticos" (Zeilinger, 1999). Este abordaje puede permitir también a los alumnos acercarse a los fundamentos "anti-intuitivos" de la M.C.

Disponer de resultados fenomenológicos realizados con una o pocas partículas permite profundizar en la cuestión del carácter probabilístico de la M.C., eliminando de esta forma la

posibilidad de que pueda ser mezclado con el tratamiento de probabilidades de la Física Clásica y da también, por ejemplo, a la discusión presentada por Feynman sobre el experimento de interferencia de Young para el electrón un "carácter de realidad". La difracción de electrones dispersos por cristales fue anteriormente observada como una distribución de trazos de electrones en una cámara de Wilson que resultan más difíciles de ser explicadas en términos simples.

Para ejemplificar este punto, describiremos un tipo de medición "libre de interacción"- o sea, donde es posible obtener información acerca de la existencia de un objeto sin interferir directamente con él-, según propuesta por Elitzur & Vaidmann¹⁰ (1993). El planteo del experimento es consecuencia del carácter no local de la M. C. y, por lo tanto, no tiene análogo en la Física Clásica. El método recurre a un interferómetro de partícula, similar al de Mach-Zehnder de la Óptica Clásica (Fig. 1). Como en todo interferómetro, un rayo de luz es dividido en dos partes, que transitan separadamente por los dos brazos, para luego juntarse, dando un padrón de interferencia. En este caso en particular, lo que transita por el interferómetro es un sólo fotón. Analizando la interferencia desde una **visión de partícula** ésto implica que en el primer semiespejo se le ofrecen al fotón dos caminos para alcanzar el segundo semiespejo; **desde una visión de onda clásica**, la onda de luz se propaga simultáneamente por los dos brazos.

¹⁰ Esta propuesta fue experimentalmente testada por Kwiat, Weinfurter & Zeilinger(1996).

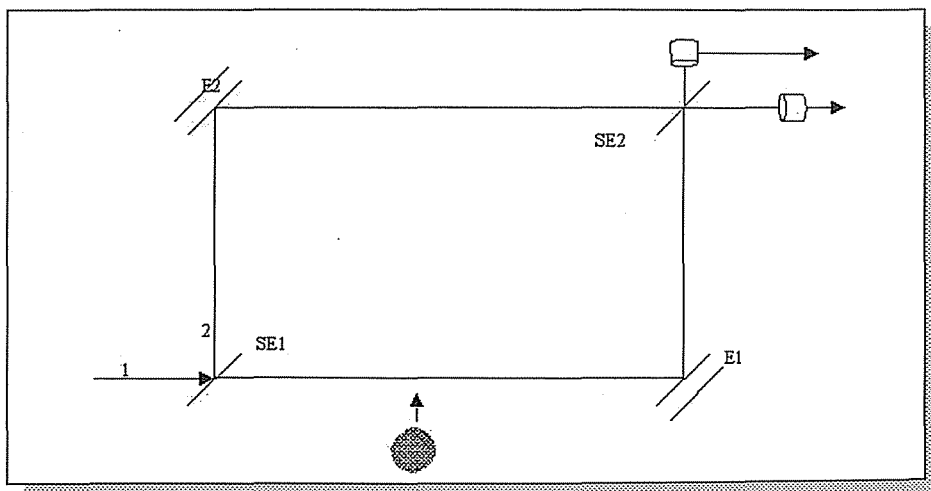


Figura 1: Interferómetro de Mach-Zehnder: Consiste en dos semiespejos (SE1 y SE2), dos espejos (E1 y E2) y dos detectores en los extremos de salida(D1 y D2).La luz que entra es dividida por el primer semiespejo, y "reunida" por el segundo semiespejo. La diferencia entre los caminos ópticos determina los padrones de interferencia.

El sistema se dispone de manera que las posiciones de los semiespejos y de los espejos son tales que, por interferencia destructiva, el detector D2 no detecta cualquier fotoocurrencia, en tanto todas son detectadas por D1. En este caso los caminos son indistinguibles. Pero si se bloquea uno de los brazos del interferómetro con un objeto absorbente, sin modificar la posición de los espejos y de los semiespejos, los caminos se hacen distinguibles. O sea, el fotón puede elegir entre ir por el camino 1 y ser absorbido por el objeto (probabilidad igual a $1/2$, para el caso de un aparato "perfecto") o ir por el camino 2 y tener entonces igual probabilidad de ser detectado por cualquiera de los detectores (con probabilidad igual a $1/4$ en cada caso). Si el fotón es detectado por D1, en principio no se sabe si el objeto está o no en el otro brazo (la situación es la misma que sin la presencia del objeto). Pero si es detectado en D2 se sabe que el fotón siguió por el camino 2 (si no, hubiese sido absorbido por el objeto). Esto implica que se puede obtener información acerca de la presencia de un objeto sin interactuar con él¹¹.

Schenzle analiza que si se hace una imagen supersimplificada del fotón como una partícula compacta, como una pequeña bola, no se puede imaginar que el fotón "habiendo elegido" el camino 2, y por lo tanto sin "conocimiento" de la presencia del objeto en el otro camino sea capaz, sin embargo, de informar al experimentador sobre su presencia. Esta imagen del fotón, tanto como la ondulatoria, lleva a concepciones equivocadas. La discusión debería centrarse no en la dualidad onda-partícula, sino en el propio estado del sistema descrito por la función de onda Ψ . La función de onda Ψ del fotón representa los dos caminos como una **unidad** y no como **alternativas**. Eso es difícil de expresar en el lenguaje y en imágenes. Sin embargo, por ser la Mecánica Cuántica una teoría no local, no tienen validez las distinciones "elige un camino o el otro", sino "elige un camino **tanto como el otro**". Solamente tiene sentido hablar que existen las dos posibilidades **en simultaneidad**.

Así como este ejemplo, existen otras experiencias que permiten discutir los aspectos básicos y más profundos de la Mecánica Cuántica de manera cualitativa.

¹¹ En una generalización de esta experiencia se puede aumentar la probabilidad de detección sin interferencia, o sea llegar a la información buscada, a 99,99% (Schenzle, 1996).

CONCLUSIONES.

En resumen, según los argumentos aquí presentados, se debería enfatizar, en los cursos introductorios de Mecánica Cuántica, aspectos cualitativos peculiares como los que fueron señalados anteriormente, para que se pueda dar explícitamente a los alumnos las herramientas necesarias para la modelización de la "intuición" cuántica. Dichos aspectos cualitativos deberían ser introducidos a partir de la propia Teoría Cuántica, dado que parecería que, por una parte, los "puentes" históricos, por lo menos en los cursos introductorios, solamente sirven para reforzar aspectos clásicos que no son deseados. Por otra, la presentación puramente "formal" no garantiza, por sí sola, la generación de modelos mentales que permitan al alumno dar significados contextualmente aceptados a los principios cuánticos. Posiblemente en cursos posteriores se debería discutir nuevamente los aspectos cualitativos junto al formalismo matemático, indicando también sus diferencias de las aproximaciones semiclásicas.

Las asignaturas de Seminarios o de Fundamentos epistemológicos de la Ciencia podrían discutir posteriormente aspectos relacionados a las distintas interpretaciones de la Mecánica Cuántica, entendiendo por interpretación el conjunto de ideas que, no afectando las predicciones observacionales de la teoría, se agregan al formalismo mínimo de la Teoría Cuántica (Pessoa Jr., 1997). En este trabajo no hemos pretendido entrar en consideraciones acerca de esas interpretaciones, pues creemos que en un primer momento la teoría debe ser "comprendida" bajo su interpretación más usual¹².

BIBLIOGRAFÍA.

- BARRETTO BASTOS F., J. 1994. Dangerous effects of the incomprehensibility in microphysics *Frontiers of Fundamental Physics*, 485-492.
- CAIRNS-SMITH, A. 1996. *Evolving the mind* Cambridge: Cambridge University Press.

¹² Entendemos por interpretación más usual la que aparece en la mayoría de los libros de M. C.. Esta interpretación, también denominada de ortodoxa (Schreiber, 1994) es una derivación de la hipótesis de Max Born, introducida básicamente por Dirac. Para la interpretación usual el estado de un sistema físico adquiere una existencia "real".

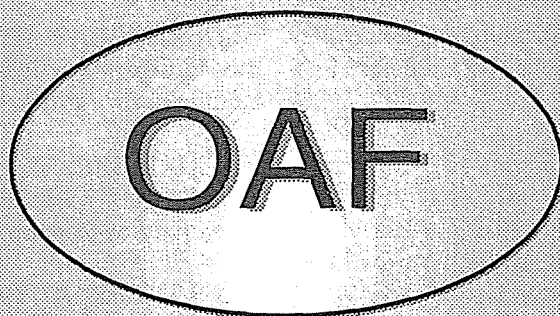
- EINSTEIN, A., PODOLSKY, B. & ROSEN, N. 1935. Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*, 47, 777-780.
- ELITZUR, A. & VAIDMAN, L. 1993. Quantum mechanical interaction-free measurements. *Foundations of Physics*, 23(7), 987-997.
- FEYNMAN, R. 1966 *The Feynman's lectures on Physics*. Vol. 3. Massachusetts: Addison Wesley Publishing Company.
- FISCHLER, H. & LICHTFELDT, M. 1992. Modern physics and students' conceptions *International Journal of Science Education*, 14(2), 181-190.
- GALIAZZI, M., OLIVEIRA, L., MONCKS, M. & VALERÃO, G. 1997. Perfis conceituais sobre o átomo. Atas do Primeiro Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Ciências (I ENPEC), 345-356.
- GELL-MANN, M. 1981. *The nature of matter* Oxford: Clarendon Press.
- GRECA, I. & HERSCOVITZ, V. 2000 Mecânica Quântica e intuição. Em Pessoa Jr. (Ed) *Fundamentos da Física 2 - Simpósio David Bohm*, São Paulo: Ed. Livraria da Física.
- GRECA, I. & MOREIRA, M. 1996. Tipos de modelos mentales utilizados por físicos en actividad. Trabajo presentado en el 3er Simposio de Investigadores en Enseñanza de la Física (SIEF III), UNC, Argentina.
- GRECA, I. & MOREIRA, M. 1997. Kinds of mental representations - models, propositions and images - used by college physics students regarding the concept of field. *International Journal of Science Education*. Vol. 19 (6) 711-724.
- GRECA, I. & MALLMANN, L. 1997. Modelos mentais do conceito de força. Atas do Primeiro Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Ciências (I ENPEC), 280-293.
- HOBSON, A. 1996. Teaching quantum theory in the introductory course *The Physics Teacher*, 34, 202- 210.
- JOHNSON-LAIRD, P. 1983. *Mental models*. Cambridge: Harvard University Press.
- JOHNSON-LAIRD, P. & BYRNE, R. 1991. *Deduction*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- KRAGH, H. 1992. A sense of history: history of science and the teaching of introductory quantum theory. *Science & Education*, 1, 349-363.
- KWIAT, P.; WEINFURTER, H. & ZEILINGER, A. 1996. Quantum seeing in the dark. *Scientific American*, November, 52-55.
- MERZBACHER, E. 1990. How shall we teach physics in the 21st century? *American Journal of Physics*, 58 (8), 717.
- PESSOA JR., O. 1997. Interferometria, interpretação e intuição: uma introdução conceitual à Física Quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 19 (1), 27-48.
- SCHENZLE, A. 1996. Illusion or reality: the measurement process in quantum optics. *Contemporary Physics*, 37(4) 303-320.
- SCHREIBER, Z. 1994. *The nine lives of Schrödinger's cat*. Unpublished master thesis. University of London.
- ZEILINGER, A. 1999. In retrospect. *Nature*, 398, 209-211.
- WICHMANN, E. 1971. *Quantum physics. Berkeley Physics Course*, Vol. 4. Massachusetts: McGraw-Hill Book Company.



Ministerio de Educación
de la Nación



Facultad de Matemática,
Astronomía y Física - UNC



OLIMPIADA ARGENTINA DE FÍSICA

Secretaría OAF:

Telefax: (0351) 469-9342

Facultad de Matemática, Astronomía y Física

Ciudad Universitaria

5000 - Córdoba

Fax: (0351) 433-4054
