

---

# UNA EXPERIENCIA EN EL MARCO DE LA INTRODUCCIÓN DE LA FÍSICA CUÁNTICA EN LA ESCUELA SECUNDARIA

Alberto Stefanel

Liceo Scientifico Statale "G. Marinelli", Udine  
Unità di Ricerca in Didattica della Física, Università di Udine

Traducción: Dra. Zulma Gangoso  
Fa.M.A.F. - Universidad Nacional de Córdoba

---

*El presente artículo ha sido publicado en italiano, en el Cuaderno Nro. 7 de "La Física en la Escuela" ("La Física Nella Scuola" LFNS). Cuaderno dedicado a temas de Física Moderna, que nace de un proyecto trianual, financiado por el Ministerio de la Universidad y de la Investigación Científica y Tecnológica, para el desarrollo de temas de física moderna al nivel del ciclo superior de la escuela secundaria.*

*La presente traducción se hace basada en el consentimiento específico de los editores de autorizar la traducción y publicación de artículos por parte de asociaciones extranjeras con quienes la Asociación para la Enseñanza de la Física (AIF) ha establecido acuerdos de intercambio y colaboración.*

*El artículo refiere una experiencia de puesta a prueba de una propuesta didáctica para introducir tópicos de Física Cuántica en los cursos superiores del nivel medio. Para su valoración se hace necesario tener en cuenta que tal propuesta está referida a un sistema educativo bastante diferente del nuestro. Para comenzar, la formación de los profesores sigue las pautas europeas es decir, los docentes de escuela media obtienen primero en las universidades el título de licenciado en física y con posterioridad realizan cursos de capacitación profesional en los que son instruidos en las materias que en nuestro medio suelen denominarse "pedagógicas".*

*De la lectura del artículo puede deducirse que el nivel de la física desarrollada en los*

*primeros cursos de escuela media, aparece también diferente no sólo de lo realmente desarrollado en nuestras aulas sino también del curriculum presentado. La bibliografía utilizada por los autores, de donde recogen aspectos de la propuesta, está prácticamente al nivel de algunas licenciaturas.*

*¿Cuál es, entonces, el valor de este artículo si se aplica a una realidad tan diferente?*

*A mi criterio, la propuesta actual puede ser muy útil para disparar algunas reflexiones.*

*En primer lugar, que la problemática de incorporar la física contemporánea a nuestras aulas debiera dejar, en muy corto plazo, de ser un proyecto vago o un problema "de los otros". La incorporación de algunos tópicos aislados, aunque bien surjan del interés de los estudiantes, puede ser planteada como estrategia de iniciación o motivación. Pero, aún en los casos en que se pretenda un curriculum que tome como ejes algunos ejemplos interesantes, el profesor de física necesita una competencia capaz de producir una articulación integradora. Y es en ese punto, en el que encuentro el valor de este artículo. El lector puede (¿y debe?) analizarlo desde su doble rol: especialista en Física y responsable de un conjunto importante de decisiones curriculares. Este artículo puede orientar un análisis de sus propias necesidades de capacitación/actualización.*

*El profesorado en Argentina, debe alcanzar "su mayoría de edad". Debemos acostumbrarnos a que sea el profesor quien, después de*

*un análisis de competencias y exigencias, reclame de los especialistas la capacitación que realmente necesita. Con esta perspectiva, recomiendo la lectura de la totalidad de la propuesta, la que puede ser analizada tanto desde la re-visión de la Física pivoteando sobre los nodos conceptuales que propone la Cuántica, como desde los aspectos curriculares que conlleva su incorporación. Hecho esto, en cualquier caso la incorporación o no de temas de Física Cuántica, será el resultado de una*

*libre decisión del docente y no de ataduras asociadas a problemas de idoneidad.*

*El segundo aspecto que interesa, es llamar la atención sobre que la propuesta presentada es parte de los resultados de un esfuerzo compartido entre el Sistema Científico-Tecnológico, una Universidad y la Escuela Secundaria. Es decir, se plasma en hechos un proyecto de educación científica que establece firmes relaciones entre Ciencia/Tecnología y Sociedad.*

*Dra. Zúlma Gangoso*

## 1. INTRODUCCIÓN.

Este trabajo resume una experiencia de enseñanza sobre la introducción de la física cuántica en el ciclo superior de la enseñanza secundaria. Ha estado conducida por el autor con el objetivo de proveer a los estudiantes de un marco organizado de la física cuántica siguiendo las líneas indicadas por el proyecto Brocca y PNI. Esta exigencia surge del hecho de que, si bien este aspecto de la física está incorporado hoy en día en casi todos los textos escolares, a menudo en la escuela secundaria es tratado de manera descriptiva o de manera desorganizada sin afrontar los nodos conceptuales que caracterizan la teoría.

La relevancia en el ámbito disciplinar y en consecuencia sobre una formación escolar básica, muestran con claridad los motivos que permiten individualizar a la física cuántica como un objetivo cultural dentro de la física moderna. La teoría cuántica representa uno de los productos científicos más importantes de nuestro siglo, ya sea por su carácter fundamental como por las consecuencias que de ella se derivan. Representa la síntesis de uno de los debates más profundos de la historia de la ciencia, que ofrece interesantes aristas de reflexión metodológica, histórica y epistemológica. Ha aportado cambios fundamentales no sólo en la física sino también en otras ciencias ( ejemplo química y astronomía).

A pesar de que existen numerosas propuestas sobre el tema [1-10], no pertenece al patrimonio consolidado de la escuela secundaria. Está entonces totalmente abierto el debate sobre cuáles temas específicos tratar y sobre cómo deben ser incorporados a los currículos escolares. Como afirma A.P. French, justamente en una propuesta suya sobre la física cuántica en la escuela [4], en didáctica "dogmatism is out of

place" y entonces pueden ser válidos distintos abordajes que sean pedagógicamente adecuados y correctos en el plano disciplinar. Es por esto que por un lado el Grupo de Investigación en Didáctica de la Física (1) y por otro algunos grupos de docentes (AIF-LFNS) [1] están estudiando el problema.

La Universidad de Udine, también ha empezado a afrontarlo con diversos abordajes, ya sea a nivel de fundamentos [7], en el ámbito de la física aplicada (por ej. [12]), o en relación a algunas problemáticas que son encuadrables en la física clásica, pero fundamentales en el desarrollo de la teoría cuántica [13].

La propuesta que aquí se presenta, lejos de querer ser exhaustiva ni modelo respecto a otras existentes [1-10], se expone como un estudio de factibilidad de este campo en situación de aula real, de la cual emergen indicaciones sobre el comportamiento de los estudiantes frente a algunos pasajes significativos, sobre las motivaciones e intereses que manifiestan frente a estos temas, sobre la modalidad organizativa frente a eventuales propuestas didácticas, y sobre el abordaje del tratamiento, por ejemplo: en relación a la amplitud de los argumentos y las posibles líneas a seguir.

Ha estado implementada durante tres períodos escolares, 1991/92 hasta 1993/94, con 25-27 alumnos de un quinto año no experimental del Liceo Scientifico Statale "G. Marinelli" de Udine. El aspecto de mayor interés deriva de haber sido llevada a cabo en un ámbito escolar estándar sufriendo los inevitables límites que imponen los exámenes oficiales, la necesidad de ubicar el tratamiento de la física cuántica en la última parte del año y la modesta infraestructura experimental disponible para estos temas.

Durante el tercer año, la propuesta ha estado enriquecida por las discusiones sobre la introducción de la física moderna en la escuela, llevadas a cabo en la Unidad de Investigación sobre Didáctica de la Física de la Universidad de Udine, y las contribuciones de A. Sconza y G. Torzo [14-16] sobre conducción eléctrica en sólidos, en el ámbito de la línea de investigación didáctica "Física Moderna", del Grupo Nacional de Didáctica de la Física.

Durante los tres años han sido propuestos los mismos contenidos culturales utilizando distintos abordajes metodológicos con el fin de involucrar a los estudiantes en el desarrollo de los temas tratados. En el presente trabajo se delinea el contexto en el cual se ha desarrollado la experiencia y la modalidad con que se condujo.

El itinerario didáctico, que ha constituido el eje de esta experiencia, ha estado organizado en tres partes como se describe en el apartado 3. La primera parte, sobre la introducción a la fenomenología cuántica, ha estado implementada haciendo una reelaboración de los temas más difusos que son encontrables aún en los textos de nivel medio [17]. La segunda parte se ha dedicado a los fundamentos de la física cuántica y se aborda según la línea propuesta por Dirac [18]. La tercera afronta aquellos contextos en los cuales la cuántica puede dar un marco más completo, como por ejemplo la conducción eléctrica en sólidos (1) abordada con el enfoque sugerido en algunas introducciones a la física de semiconductores [19] [20]. Estos últimos han sido propuestos como lugar de aplicación de los conceptos desarrollados en la primera parte y como momentos de evaluación formativa.

Las decisiones metodológicas están ilustradas en el apartado 4. En el parágrafo 5 se presenta una valoración de los logros de esta actividad con las clases que han desarrollado la experiencia y en el parágrafo 6 se tratan las conclusiones.

## 2. PRERREQUISITOS Y DECISIONES CURRICULARES.

Aún en el caso no deseable de incorporar esta temática al final de la escuela media, es indispensable sentar algunas bases para tal tarea formando sólidos prerrequisitos ya en el cuarto año. Durante el curso de termodinámica desarrollado en cuarto año, los estudiantes han debido afrontar la dificultad para interpretar desde la

teoría clásica algunos temas como la emisión y absorción de luz y la dependencia de los calores específicos con la temperatura. Esta parte ha estado integrada en la descripción de un marco en el cual se han dado las primeras hipótesis de cuantificación, en particular la obra de Einstein. En el tratamiento de las ondas y de la óptica (IV año), los estudiantes han afrontado desde el punto de vista fenomenológico la interferencia y la difracción de la luz. Aún limitado al análisis de máximos y mínimos según Fraunhofer han adquirido una base experimental suficiente para construir la interpretación cuántica según el principio de superposición lineal.

Todos los cursos involucrados en esta experiencia, tenían un conocimiento cualitativo de los espectros atómicos, desarrollados tanto en el programa de Química (IV año) como en el de física en los que se había hecho una medición cuantitativa de la longitud de onda en los espectros de algunos elementos. Estas bases han conseguido un desarrollo bastante profundo de los modelos atómicos.

Es importante introducir el análisis microscópico a partir del cuarto año, para poder desarrollar la física cuántica en quinto. Como señala Arons [21], el pasaje de la descripción macroscópica a la microscópica resulta un nodo conceptual que debe ser motivado adecuadamente y respaldado por hechos [6]. Una ocasión buena es el tratamiento de algunas magnitudes termodinámicas a través de la teoría cinética y mediante elementos de física estadística.

La discusión sobre la descripción macroscópica de la conducción en metales y sobre la estructura del átomo ha sido presentada mediante algunos experimentos clave sobre rayos catódicos y sobre la medición de la relación  $e/m$  con la bobina de Helmholtz y el método de Thomson. Estas actividades han sido desarrolladas en la primera parte de quinto año. Junto a las indicaciones de los prerrequisitos necesarios al tratamiento de la física cuántica, se comunican las elecciones ha tomar sobre el programa tradicional de física clásica.

A lo largo de los tres años en que se desarrolló la experiencia, el análisis del problema llevó a las siguientes decisiones: el tratamiento del electromagnetismo, incluidas las ecuaciones de Maxwell, se ha mantenido y eventualmente se han limitado los ejercicios cuantitativos a situaciones más simples, pero significativas para su posterior uso en el desarrollo de algunas partes de física moderna.

Se ha sacrificado el tratamiento de circuitos de corriente alternada. Más que el tratamiento escolar de los circuitos eléctricos, se ha preferido desarrollar los temas destacando la relación entre las propiedades eléctricas dinámicas macroscópicas y su interpretación en términos microscópicos.

### 3. EL ITINERARIO DIDÁCTICO.

El itinerario didáctico se desarrolla con una estructura que se puede sintetizar esquemáticamente en cuatro niveles de intervención, como se muestra en la tabla 1 y se desarrolla en este apartado.

- |   |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Experiencias introductorias y presentación de un cronograma de referencia sobre el nacimiento de la teoría de los cuantos (5-6 horas)</li> <li>b) Profundización cuantitativa sobre: efecto fotoeléctrico y el efecto Compton y el fotón, la experiencia de Franz y Hertz y los modelos atómicos, el principio de incerteza. (5-6 horas).</li> <li>c) Principios básicos de la teoría cuántica.: interpretación probabilística de la función de onda y del principio de superposición. (5-7 horas)</li> <li>d) Aplicaciones de los conceptos de física cuántica para explicar las propiedades de la materia. (6-8 horas)</li> </ul> |
|---|

\* El trabajo de profundización por grupos e individuales ha seguido al punto a). El número máximo de horas es relativo a las varias partes. En cada caso, el total de las horas utilizadas no ha superado las 25 horas.

**Tabla 1:** Estructura del desarrollo, entre paréntesis de manera indicativa, las horas dedicadas a cada parte.

En 3.1 se comunican las actividades experimentales desarrolladas y que han servido de base al proceso. En 3.2 se delinean los contenidos tratados, enfocados a la introducción de las problemáticas no resueltas por la física clásica y en la sucesiva profundización de las primeras hipótesis de cuantificación. En 3.3 se informa el tercer nivel en el que se abordan temas propios de la cuántica como el principio de superposición. El cuarto nivel, descrito en 3.4, se refiere al empleo de algunos descriptores cuánticos y algunas discusiones a nivel fenomenológico que son relevantes también en el plano de las aplicaciones y la tecnología, como las propiedades eléctricas de los materiales.

#### 3.1 Actividad de laboratorio

La actividad de laboratorio, si bien limitada sólo a aspectos introductorios, ha estado sin embargo en la base de este abordaje experimental y referida a los siguientes experimentos.

La evidencia experimental y el análisis de las propiedades de los rayos catódicos, han servido de base al reconocimiento de la naturaleza microscópica de los portadores de carga. La medición de la relación carga/masa del electrón, se ha efectuada con el método de las bobinas de Helmholtz. El estudio de la descarga de una lámi-

na de zinc cargada negativamente ha servido de referencia para el tratamiento del efecto fotoeléctrico y la posterior introducción del concepto de fotón. Para el desarrollo de tal concepto ha contribuido eficazmente el video del PSSC sobre interferencia de fotones [22].

Las experiencias sobre difracción e interferencia de la luz han sido el soporte fenomenológico sobre el cual se ha introducido la discusión de los principios de la cuántica. En particular los patrones de difracción que se obtienen haciendo incidir un haz de un láser sobre un diafragma de apertura variable, permiten una óptima verificación experimental del principio de incerteza. La experiencia sobre la interferencia ofrecen el referente experimental para discutir el principio de superposición. Con excepción de la experiencias sobre efecto fotoeléctrico, los otros experimentos formaban ya parte del patrimonio de los estudiantes y entonces han requerido un tiempo limitado de ejecución.

En el tercer año de implementación de esta propuesta, la conducción en sólidos ha encontrado un adecuado respaldo experimental en los experimentos sobre efecto Hall y sobre la resistividad en sólidos propuestos por A. Scorza y G. Torzo que fueron presentados en Udine en ocasión de la IV Semana de la Cultura Científica. [14-16].

### 3.2 Introducción a la temática y construcción de los primeros modelos cuantitativos y de los conceptos interpretativos básicos

La presentación del nacimiento de la física cuántica ha sido una ocasión para una revisión global, aunque sintética, de muchos de los conceptos fundamentales de la física clásica. Esto es así tanto sea respecto de las grandes teorías científicas del mil ochocientos, como en relación a

los problemas que tales síntesis parecían dejar todavía abiertos, poniendo de manifiesto algunos aspectos implícitos en la descripción clásica, como los conceptos de causalidad y determinismo alrededor de los cuales se ha centrado el debate sobre los fundamentos de la cuántica. El esquema de referencia sobre el cual se estructura la introducción a la cuantificación se muestra en la Tabla 2.

- |  |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Contexto problemático de la temática científica de principios de 1900</li> <li>b) El problema del cuerpo negro y la hipótesis de los cuantos.</li> <li>c) La contribución de Einstein sobre el efecto fotoeléctrico y sobre los calores específicos.</li> <li>d) Primeras confirmaciones experimentales a las hipótesis cuánticas.</li> <li>e) La difracción de electrones. Las fórmulas De Broglie-Einstein.</li> <li>f) Modelos atómicos</li> <li>g) El principio de incertidumbre.</li> <li>h) Interpretación probabilística del principio de superposición.</li> </ul> |
|--|

**Tabla 2.** Esquema de referencia

La recuperación de algunos de los aspectos más significativos del nacimiento de la teoría cuántica, ha sido particularmente importante para involucrar en la temática aún a aquellos estudiantes más propensos hacia las materias de tipo humanístico. Éstos han podido, de este modo, insertarse en el asunto con un abordaje más cercano a sus intereses, encontrando impulso para la posterior profundización.

El abordaje de las temáticas denominadas de profundización, ha sido fenomenológico con solución de algunos problemas cuantitativos en los casos más accesibles. Por ejemplo, después de haber adquirido familiaridad con aspectos cualitativos de la interacción de la radiación con la materia, se ha analizado la distribución experimental de la energía en una cavidad en equilibrio termodinámico. Sobre la base de una valoración semicuantitativa, que encuentra apoyo en el teorema de la equipartición de la energía, se reconoce que la cuantificación puede evitar la catástrofe ultravioleta, como está sugerido en [23], [24].

La introducción del concepto de fotón, privilegiada respecto a la precisión cuantitativa de las ideas de Plank, se ha desarrollado a partir de la experiencia sobre el efecto fotoeléctrico efectuada en el laboratorio sobre la descarga de una lámina de zinc irradiada con luz emitida por una

lámpara a vapor de mercurio. Una formulación más organizada, se ha desarrollado presentando en términos cuantitativos, si bien sólo a nivel teórico, el experimento de Lenard sobre la emisión fotoeléctrica y el efecto Compton.

Con el objeto de concientizar a los estudiantes sobre el hecho de que existen diversas evidencias a favor de la cuantificación, se han analizado también algunos procesos típicos de umbral (por ej. análisis de la experiencia de Frank y Hertz y, en el laboratorio, descarga en gases) además se ha seguido los sucesivos modelos atómicos que han sido capaces de dar cuenta de hechos experimentales relevantes y de sugerir nuevos experimentos de verificación (como por ejemplo el experimento de Rutherford como verificación del modelo de Thomson) abriendo, al mismo tiempo, problemáticas hasta entonces desconocidas.

El análisis de los modelos atómicos, presentados como "medios de representación" ha servido como ejemplo del propio proceso de indagación en la física que consiste en la comprobación de los "límites de validez" (de las indicaciones metodológicas del programa PNI).

La asociación de una longitud de onda  $\lambda$  a una partícula material que posee un impulso  $p$ , según la hipótesis de De Broglie  $p = h/\lambda$ , se ha

hecho a partir de la evidencia experimental de la difracción de electrones. La condición de onda estacionaria para las ondas de De Broglie provee la justificación de la hipótesis de cuantificación de Bohr. (3). Tal análisis del modelo semiclásico y la siguiente crítica, a la luz de los principios de la mecánica cuántica, se ha utilizado también como momentos de evaluación formativa tendiente a valorar el efectivo grado de comprensión de los estudiantes de las novedades conceptuales de la física cuántica.

Se ha dado un espacio particular a las relaciones de Einstein-De Broglie, porque a partir de ellas se han desarrollado tanto las reflexiones sobre el principio de incerteza de Heisenberg como el trabajo de Schroedinger que ha dado origen a la formulación de las ecuaciones que llevan su nombre. Las relaciones de incerteza que establecen la imposibilidad de medir con precisión arbitraria variables conjugadas como momento y posición, energía y tiempo, se han introducido partiendo de experimentos pensados simples, con propone por ejemplo Feynman en [1] y a través del experimento sobre difracción descrito en 3.1.

Se han planteado también ejercitaciones sobre el tema. Por ejemplo se han propuesto ejercicios en los que se estimaban incertezas en una magnitud a partir de conocer la incerteza de una magnitud conjugada. Las relaciones de Heisenberg se han utilizado también para justificar la existencia de un nivel fundamental en el átomo de hidrógeno y para excluir la existencia de un electrón confinado en el interior de un neutrón?

### 3.3 Análisis de algunos principios básicos de la física cuántica.

Los capítulos introductorios de algunos textos sobre principios básicos de la física cuántica, como por ejemplo aquellos de Dirac [18], Landau y Lifshitz [25] y Sakurai [26] constituyen una verdadera veta de la cual tomar indicios didácticos inclusive para la escuela secundaria.

En la experiencia conducida se han seguido las propuestas de Landau y Lifshitz, en relación al principio de incerteza y de Dirac en cuanto al principio de superposición. Podemos delinear la manera en la cual se han abordado algunos de los aspectos más significativos.

Se ha seguido un camino que desarrolla las

consecuencias del principio de incerteza. El no poder medir con precisión arbitraria ya sea el impulso o la posición para una dirección dada impide, por ejemplo, atribuir una trayectoria a un electrón. Esto lleva a la necesidad de introducir una descripción de los fenómenos basada únicamente en previsiones probabilísticas.

Por ejemplo lo que tiene sentido preguntarse es: una vez localizado un electrón en una cierta región del espacio y con una cierta incerteza sobre la magnitud de su impulso, con qué probabilidad podrá ser localizado el electrón, en una posterior medición, en otra región del espacio?. La física cuántica debe permitir calcular esta probabilidad. En forma más general, debe proveer una descripción de los sistemas mecánico - cuánticos que permita efectuar previsiones sobre los resultados de una medición a partir de resultados conocidos de una medición precedente.

La comprensión, por parte de los estudiantes, de la problemática abierta por el principio de incerteza ha permitido pasar a la formulación del principio de superposición a partir del análisis de los fenómenos de interferencia y de polarización. Este camino ha permitido mostrar de qué manera el esquema interpretativo cuántico, comparado con otros posibles, es el único en condiciones de dar cuenta, de modo coherente y cerrado, de los fenómenos observados.

Por ejemplo, en el análisis del fenómeno de la doble rendija, se ha procedido con la introducción de los estados que Dirac llama traslacionales[18], cada uno de los cuales corresponde a una de las ondas con las que clásicamente se describe la interferencia luminosa, pero no es asociable a trayectorias clásicas. Éstos pueden ser determinados por medio de mediciones de localización (con un diafragma) y de impulso (aprovechando el efecto fotoeléctrico) de los fotones.

La necesidad de preservar la unidad del fotón (única característica de un fotón, experimentalmente observable, común a las partículas clásicas) lleva a la necesidad de renunciar a la descripción clásica y demanda en cambio el requisito de atribuir una amplitud de probabilidad a cada uno de los estados traslacionales. La suma de estas amplitudes permite interpretar correctamente la figura de interferencia aún en una descripción como partícula.

Aunque sin alcanzar una formalización, los estudiantes han adquirido ya, de todos modos,

elementos suficientes para interpretar fenómenos significativos y afrontar posteriores aplicaciones como viene delineado en el apartado 3.4.

En relación a estos conceptos se han propuesto ejercicios en grupo para comparar un proceso de dos estados en física cuántica, (interferencia por una doble rendija) y un proceso clásico, pero no determinista (el lanzamiento de una moneda). El punto fundamental ha sido el de hacer reconocer a los alumnos el carácter intrínsecamente determinístico del proceso clásico, el que se trata en términos estadísticos sólo por el desconocimiento de las condiciones iniciales exactas y de la ecuación de movimiento. En contraste al fenómeno cuántico, intrínsecamente probabilístico, no obstante puedan ser conocidas con exactitud tanto las condiciones iniciales como la ecuación de movimiento.

En el trabajo en clase, se han delineado también algunos de los problemas que ponen en evidencia la relación entre la fenomenología macroscópica clásica y aquella microscópica cuántica: el gato de Schroedinger se ha introducido como ejemplo de la problemática inherente a la aplicación de la mecánica cuántica a sistemas macroscópicos y se ha mostrado que "la mecánica cuántica ocupa una posición muy particular en el ámbito de las teorías físicas: contiene a la mecánica clásica como caso límite y, al mismo tiempo, necesita de este caso límite para su propia fundamentación"[25].

La exigencia de ir profundizando sucesivamente, ha requerido de completar el tratamiento introduciendo el principio de exclusión de Pauli, como evidencia fenomenológica que se deriva de la experiencia de Stern y Gerlach y de la estructura de los átomos con varios electrones, y las bases relativas a la estadística cuántica, desarrollando ejemplos simples conteos en el caso de partículas distinguibles e indistinguibles.

### 3.4 Aplicaciones de los conceptos introductorios de física cuántica

Con el fin de no dejar a los estudiantes con la idea de que la mecánica cuántica es sólo un esquema interpretativo de algunos fenómenos microscópicos, se han desarrollado algunos temas en los cuales los conceptos fundamentales proveen, además de los instrumentos descriptivos indispensables, potentísimos medios de búsqueda y predicción.

Estos son los considerados:

1) El átomo según la moderna mecánica cuántica. Por medio del principio de incerteza se ha motivado la existencia del nivel fundamental del átomo de hidrógeno (de manera análoga, por ejemplo con está propuesto en [6] y [10]). Se ha dado una descripción cualitativa del átomo teniendo en cuenta la interpretación probabilística del electrón y en particular se ha puntualizado el significado de orbital, muy usado en química.

2) El efecto túnel. Se ha trabajado con un análisis semicuantitativo acerca de la reflexión de ondas que inciden sobre una barrera de potencial. Se ha abordado con una modalidad como la propuesta por Feynman en [27].

3) Número cuánticos y tabla de elementos. Se han reinterpretado y por lo tanto desarrollado los conocimientos que poseían los estudiantes sobre la tabla periódica.

4) Propiedades eléctricas de los sólidos.

Tal como sugiere el planteo propuesto por Kittel [19], el que puede encontrarse también en otras introducciones al tema [20] [8], se ha presentado un modelo semicuantitativo para la formación de bandas en semiconductores, partiendo del análisis de átomos en dos niveles que interactúan según un potencial atractivo a gran distancia y repulsivo a distancias cortas. Los resultados se han extendido después a sistemas con  $N$  átomos iguales y se han aplicado al caso de los elementos del IV grupo del cual emerge porque algunos cristales son conductores y otros son semiconductores o aisladores.

El modelo permite comprender la formación de lagunas y el rol que juegan las impurezas al momento de determinar las propiedades eléctricas de un semiconductor. Como ejemplo de aplicación y con la intención de motivar el tratamiento teórico se han introducido la juntura p-n, los diodos y el transistor. Este enfoque se relaciona directamente con la propuesta de Sconza en [15]. El desarrollo de los dos primeros argumentos ha ofrecido algunos puntos de verificación formativa de la adquisición de los principios básicos de la física cuántica. El tercer argumentos ha encontrado un recuerdo inmediato de los cursos de química. El último se presenta como la desembocadura natural del tratamiento integrado de todo el quinto año.

## 4. ASPECTOS METODOLÓGICOS

En los tres años de experimentación, el itinerario didáctico ha sido análogo así como la

presentación de las actividades y el tiempo empleado en desarrollarlo. En la tabla 3 se reporta un esquema de la organización didáctica de la actividad. Como se ve la propuesta prevé no menos de 20 horas y, como se ha delineado en el párrafo 2, requiere de una adecuada preparación en 4º y 5º año. El laboratorio se ha utilizado como una introducción a los aspectos fenomenológicos. La parte de laboratorio se ha ampliado durante el tercer año a expensas de las clases magistrales y las actividades de seminario, las que de todos modos han tenido siempre prácticamente el mismo peso. La participación directa de los alumnos se ha logrado con métodos diferentes: el primer año ha realizado trabajos de grupo tendientes a tratar o desarrollar temas específicos; el segundo año se ha privilegiado el trabajo personal de profundización de los alumnos individualmente y el tercer año se ha dado más espacio a la actividad experimental y la consiguiente reelaboración.

El abordaje didáctico se ha desarrollado sobre varios niveles delineados en el párrafo 3 "según un proceso espiralado" de sucesivos refinar y profundizar en sentido cuantitativo, que ha permitido introducir los conceptos con la necesaria graduación propia y típica de la adquisición por parte de los estudiantes. Al hacer esto se han seguido las indicaciones metodológicas propuestas por el ministerio para las clases de física en sus programas experimentales con orientación científica. De este modo, este trabajo puede proveer elementos útiles para una posible valoración de tales programas.

La intervención del docente en los seminarios coordinados por los estudiantes ha servido para hacer emerger los elementos formativos sea de contenido, sea metodológicos. La síntesis de varios argumentos, si bien delineada por el docente, ha sido construida junto a los estudiantes. De modo similar se ha procedido con relación al estudio de los ámbitos de aplicación de la física cuántica. El docente tiene un rol principal al delinear el esquema interpretativo fundamentado en los principios cuánticos, pero a su vez involucra a toda la clase en la construcción gradual de los conceptos y de las posibles interpretaciones.

## 5. EVALUACIÓN DE LOS ALUMNOS.

La valoración del aprendizaje y alcance de los objetivos formativos se ha efectuado de manera diferenciada. Se han utilizado exposiciones orales de tipo tradicional global sobre la

totalidad del curso de física del quinto año, incluyendo de este modo también los elementos de física cuántica introducidos. Por otra parte se han valorado los contenidos generales en las discusiones en seminarios conducidos de alumnos individuales o grupos que habían profundizado diferentes temas. El debate en clase se ha utilizado siempre con el doble valor de ser un momento de profundización a la vez que de evaluación. La ejercitación escrita efectuada ha provisto elementos ulteriores de valoración sobre temas específicos.

El perfil de cada uno de los grupos de alumnos involucrados en esta propuesta experimental no se ha alejado demasiado de la media relativa al conjunto de los tres grupos.

Si bien con las reservas que se pueden tener en relación a una valoración que ha utilizado preferentemente instrumentos de tipo cualitativo, se pueden indicar algunas conclusiones. En las evaluaciones orales, de los conceptos que venían delineados de modo correcto más de la mitad de los estudiantes incorporaban, sorprendentemente, también la interpretación probabilística y el principio de superposición. En efecto una vez superada la fase inicial los alumnos han comprendido que debían insertarse en un contexto diferente al de la mecánica clásica y entonces han hecho referencia a los conceptos de la teoría cuántica. Más dificultad se ha encontrado en los temas en los cuales conviven abordajes semiclásicos respecto del nuevo esquema interpretativo cuántico. Resultados análogos pero con mayor diferenciación, han emergido de las ejercitaciones.

La mayoría (más del 60 % de los estudiantes) ha estado en condiciones de desarrollar correctamente ejercitaciones numéricas simples (Por ejemplo estimaciones basadas en la relación de indeterminación) y cuestiones interpretativas (por ejemplo individualizar las hipótesis no cuánticas en el modelo de Bohr). Mientras un grupo limitado de estudiantes (alrededor del 20%) ha manifestado un dominio de los conceptos claves de la física cuántica cuando les han sido propuestos preguntas que requerían una elaboración más profunda de esta temática (por ejemplo: reconocimiento de las órbitas de Bohr en término de valores de esperanza de la variable posición)

## 6. CONCLUSIONES.

De la experiencia e implementación que se

propine han salido algunas indicaciones útiles sobre los temas que pueden abordarse en la escuela secundaria. En particular emergen elementos significativos con relación a la posibilidad de afrontar algunos conceptos fundamentales de la teoría cuántica, como el principio de superposición.

La exigencia de un abordaje más profundo que aquel seguido en la experimentación presentada y que alcance también una formalización de los conceptos, implica el deber proyectar otro diseño más orientado en ese sentido y que esté fundado en un ámbito fenomenológico a partir del cual construir una primera formalización. Sobre esta línea se está desarrollando un debate en el ámbito del grupo de Investigación en Didáctica de la Física de la Universidad de Udine.

Las conclusiones que se pueden obtener de la utilización de modelos semiclásicos en este tratamiento no pueden ser terminantes. Es necesaria una búsqueda ulterior para ver si la utilización de tales modelos está o no estrechamente relacionada a la formación de errores conceptuales y si es posible analizarlos para construir una progresión didáctica útil. La reflexión sobre una línea histórica ofrece óptimos indicios como elementos motivacionales. En relación a este aspecto, lo más interesante es el significativo interés que diversos estudiantes mostraron para profundizar por sí mismos acerca del nacimiento de la teoría cuántica.

Con relación al contexto de intervención de la cuántica se puede decir que la parte relativa a las propiedades eléctricas de la materia ha encontrado buenos resultados, sea en términos de intereses como de éxitos. Esto seguramente debido a las numerosas aplicaciones tecnológicas que se derivan de las propiedades eléctricas de los semiconductores, que son cercanas a los estudiantes.

Esto pone de manifiesto la importancia que tiene contextualizar el estudio de la física, aspecto que se evidencia más particularmente en el último año de la experiencia durante el cual se hicieron mediciones del coeficiente Hall y resistividad, motivando a los estudiantes y mostrando aspectos concretos del abordaje adoptado.

En lo que respecta al impacto del trabajo en grupos, es necesario poner de manifiesto una acentuada diversidad de éxito, a pesar de que los grupos eran homogéneos. Los resultados que globalmente pueden considerarse mejores, han

venido de aquellos grupos en los que el líder ha sabido involucrar y estimular a los más débiles, los que han podido, efectivamente, beneficiarse de un trabajo colaborativo.

Finalmente, respecto a las profundizaciones personales se puede decir que, quitando una mínima parte de los alumnos que no han podido ser motivados por la propuesta, todos los alumnos han encontrado un campo específico de intervención, en el cual estaban particularmente interesados y se han visto motivados para producir trabajos en cada caso aceptables y con aspectos significativos.

#### NOTAS.

(1) Desde hace varios años existe una investigación coordinada nacionalmente por G. Rinaudo y financiada con fondos de MURST, 40 % en la cual participan las sedes de las Universidades de Milán, Módena, Padua, Palermo, Pavia, Pisa, Torino y Udine.

(2) Se debe precisar que la moderna ciencia de los materiales usa para la caracterización, también técnica de análisis de las propiedades (como por ejemplo las eléctricas) fundadas en la física clásica y los modelos interpretativos no cuánticos.

(3) Para una descripción de un modelo mecánico de las ondas de De Broglie en un átomo de Bohr, vea (2).

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

[1] R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Addison, Weseley Publ. Co., 1964.

[2] U. Haber-Schaim, J.H. Dodge, J. Walter, *Fisica*, del PSSC, vol. 2, Bologna, Zanichelli, 1973.

[3] M.G. Ebison, "Introducing the Uncertainty Principle", in *Seminar on the Teaching of Physics in Schools 2*, Gyldental, 1975.

[4] A.P. French, "Experimental Bases for Quantum Ideas", in *Seminar on the Teaching of Physics in Schools 2*, Gyldental, 1975.

[5] U. Haber-Schaim, "On the Teaching of Quantum Physics in the Senior High School", in

Seminar on the Teaching of Physics in Schools 2, Gyldental, 1975.

[6] A. Loria, C. Malagodi, M. Michelini, "School Quantum Physics", in *Structure of matter in the school*, Budapest, 1979.

[7] G.C. Ghirardi, R. Grassi, M. Michelini, "A Fundamental Concept in Quantum Theory: The Superposition Principle", in *Thinking Physics for Teaching*, New York, Plenum Press, 1995.

[8] P. Violino, O. Robutti, *La Fisica e i suoi modelli*, Bologna, Zanichelli, 1995.

[9] E. Fabri, "Come introdurre la fisica quantistica nella scuola secondaria", *LFNS*, XXIX, Supplemento (1996).

[10] M. Giliberti, C. Marioni, "Introduzione di alcuni elementi di fisica dei quanti nella scuola secondaria superiore", in questo stesso Quaderno.

[11] AA.VV., "Proposte didattiche per l'insegnamento della fisica quantistica", *LFNS*, XXVI, 2 IR, Quaderno 2 (1993); AA. VV., "Fisica e didattica: vecchi e nuovi problemi", *LFNS*, XXIX, 1 Supplemento (1996).

[12] F. Corni, E. Mazzega, M. Michelini, G. Ottaviani, "Capire la Time-Resolved Reflectivity: una tecnica di analisi basata sull'interferenza da lamina sottile", *LFNS*, XXVIII, 1 (1995); F. Corni, M. Michelini, L. Santi, F. Soramel, A. Stefanel, "The concept of cross section", *Atti del Congresso GIREP '95*, Udine, ed. Forum; F. Corni, M. Michelini, L. Santi, A. Stefanel, "Rutherford Backscattering Spéc-trometry: A Technique worth introducing into pedagogy", *Atti del Congresso GIREP '95*, Udine, ed. Forum; G. Giugliarelli, M. Michelini, E. Mazzega, G.P. Ottaviani, "Mott transition as a way to discuss electrical transport properties", *Atti del Congresso GIREP '95*, Udine, ed. Forum.

[13] V. Mascellari, E. Mazzega, M. Michelini, "Un sistema per esperienza di ottica on-line e indicazioni per attività didattiche nello studio della diffrazione ottica", *LFNS*, XXV, 1, Speciale (1992); G.L. Michelutti, G. Della Giusta, "Fraunhofer diffraction revisited", *Phys. Educ.*, 28 (1993).

[14] A. Sconza, G. Torzo, M. Michelini, "Quanti sono gli elettroni nei metalli?", *LFNS*, XXVIII, 2 (1995).

[15] A. Sconza, "Il trasporto della carica elettrica nei solidi (metalli, semiconduttori e isolanti, superconduttori)", *LFNS*, XXIX, 1, Supplemento, (1996).

[16] A. Sconza, G. Torzo, "Esperimenti sul trasporto della carica elettrica nei solidi (metalli e semiconduttori, in questo stesso Quaderno.

[17] P. Caldirola, G. Casati, F. Tealdi, *Corso di Fisica*, vol. 3, Milano, Ghisetti e Corvi, 1986; A. Caforio, A. Ferilli, *Physica*, per i Licei Scientifici, vol. 3, Firenze, Le Monnier, 1989; D. Halliday, R. Resnick, *Fondamenti di Fisica*, per le scuole superiori, vol. 3, Bologna, Zanichelli, 1990; P. A. Tipler, *Invito alla fisica*, vol. 3, Bologna, Zanichelli, 1991.

[18] P.A.M. Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics*, Oxford Calderon Press, 1958.

[19] C. Kittel, *Introduzione alla fisica dello stato solido*, Torino, Boringhieri, 1971.

[20] J. Millman, C.C. Halkias, *Dispositivi e circuiti elettronici*, Torino, Boringhieri, 1971.

[21] A.B. Arons, *Guida all'insegnamento della fisica*, Bologna, Zanichelli, 1992.

[22] J. King, "Interferenza di fotoni", in *PSSC*, Libro di consultazione e guida per l'insegnante, vol. 4, Bologna, Zanichelli, 1973.

[23] G. Gamow, *Trent'anni che sconvolsero la fisica*, Bologna, Zanichelli, 1966.

[24] A. Baracca, *Manuale critico di meccanica statistica*, Catania, Culc, 1980.

[25] L.D. Landau, E.M. Lifschitz, *Meccanica quantistica teoria non relativistica*, Roma, Ed. Riuniti, 1976.

[26] J.J. Sakurai, *Meccanica quantistica moderna*, Bologna, Zanichelli, 1996.

[27] R.P. Feynman, *QED*, Milano, Adelphi, 1989.