

1 Objetivo del documento y alcance propuesta

Intentando cumplir el objetivo marcado de reflejar una propuesta de puesta en práctica en el aula de uno de los contenidos trabajados en las sesiones presenciales del curso de Mecánica Cuántica (MC), además está como objetivo que la propuesta sea realizable y útil. Una de las utilidades es tender un puente entre Secundaria y Universidad: así alumnos y profesores podrán tener una visión de lo que se hace a nivel teórico y experimental en Física Cuántica en la Universidad (y posteriormente en aplicaciones), y desde ella se conozca qué y cómo se les enseña al respecto. De esta manera pueden surgir propuestas para fomentar en el momento adecuado el conocimiento general pero correcto y posible interés por el campo. Con limitación de 5 folios no puede tener un alcance que entre mucho en detalle, por lo que apporto ideas sobre propuestas generales, y añado licencia Creative Commons, para que quien quiera pueda modificarlo y ampliar ideas.

2 Tratamiento MC en el aula antes de la Universidad.

Pensando en que la propuesta sea realizable y útil, intento reflexionar sobre cómo se trata la MC, y cómo se puede tratar con los condicionantes que hay en ese contexto (preuniversitario y en Madrid).

2.1 Nivel y materia para la propuesta. Tratamiento de MC en currículo.

Práctica en el aula implica concretar nivel y materia: siendo mi especialidad Física y Química parece lógico elegir Física en 2º de Bachillerato, y sin embargo, si se analiza el currículo oficial de Madrid D67/2008 en cuanto a contenidos, se ve que si bien para Física hay un bloque de Física moderna donde se menciona *“Efecto fotoeléctrico y espectros discontinuos: Insuficiencia de la Física clásica para explicarlos. Hipótesis de Planck. Cuantización de la energía. Hipótesis de De Broglie. Dualidad onda corpúsculo. Relaciones de indeterminación. Aportaciones de la Física moderna al desarrollo científico y tecnológico”*, curiosamente es en la materia de Química donde se menciona más explícitamente la MC *“Espectros atómicos. Orígenes de la teoría cuántica. Hipótesis de Planck. Efecto fotoeléctrico. Modelo atómico de Bohr y sus limitaciones. Introducción a la mecánica cuántica moderna. Su importancia. Orbitales atómicos. Números cuánticos”* Además, los criterios de evaluación de ambas materias también la mencionan. De manera que si la propuesta es suficientemente general, puede ser aplicable a ambas materias.

En Física y Química de 1º Bachillerato se menciona también *“El modelo atómico de Bohr: Distribución electrónica en niveles energéticos. Introducción cualitativa al modelo cuántico”*. En la materia de Ciencias para el Mundo Contemporáneo de 1º de Bachillerato, común y de culturalización científica general, hay un bloque que trata el procesamiento e intercambio de información, donde se podría mencionar la MC, entrando algo más en detalle si es un grupo de ciencias, siendo el momento adecuado para despertar o confirmar interés en Física de 2º de Bachillerato y estudio universitario asociado.

Considero irreal considerarlo en Secundaria al quedar fuera del alcance de alumnado ordinario con especial interés (incluso cursando Ampliación de Física y Química de 4º ESO o participando en alguna actividad específica como club de ciencias), y tan sólo se podría considerar algo más real proporcionar material introductorio a alumnado de altas capacidades que mostrase interés en Física, aunque en ese caso no sería “puesta en práctica en el aula”, sino preparación de materiales.

2.2 Temporalización

La realidad es que en Física de 2º de Bachillerato el tiempo es ajustado por las fechas de la PAU y el temario que hay que completar, y en una programación normal se puede considerar que en total se dispone de unas 8 sesiones para el bloque de MC, por lo que esta propuesta no debería utilizar más de ¼ de esas sesiones, es decir 2 en total. Física es ideal porque el bloque que incluye MC está al final del curso que es cuando se sabe si hay flexibilidad para añadir sesiones especiales, además de ser un momento cercano a la decisión real de elegir estudios universitarios. Si la materia es Química el bloque asociado se suele ver a principio de curso, y como mucho sería una sesión en total. En el caso de CMC, con menos profundidad, podría ser también una sesión a final de curso.

2.3 Tratamiento habitual en libros y docencia actual

Creo que una nueva propuesta didáctica debe partir de conocer qué y cómo se hace actualmente, para tomarlo como punto de partida de cosas a cambiar, eliminando, modificando o añadiendo. Intento aportar mi visión del tratamiento habitual en libros de Física y de Química en 2º Bachillerato, que intentan cubrir lo indicado en el currículo oficial (Física y/o Química). En el aula muchas veces se sigue el libro o se hace más breve por limitaciones de tiempo.

-(FQ) Sí se trata bastante el contexto temporal de la crisis de la física clásica a comienzos siglo XX para explicar ciertos fenómenos, comentando siempre la hipótesis de Planck a partir de la imposibilidad de explicar la radiación del cuerpo negro.

-(Fq) Efecto fotoeléctrico, principio indeterminación: idea básica y fórmulas.

-(Fq) Hipótesis De Broglie: idea básica, confirmación experimental, y fórmula.

-(Q) Espectros discontinuos y modelos atómicos: Bohr, Sommerfield, Schrödinger (orbitales como zonas probabilidad a partir números cuánticos en ecuación Schrödinger)

-(FQ) Se queda en años 20 con la formulación MC. En algunos casos se hace una somera mención a unificación fuerzas en años posteriores (electrodébil) y nuevas partículas, sin relacionarlo con MC.

3 Propuestas generales

Con el objetivo de que se puedan ampliar propuestas, planteo aquí tan solo ideas / aspectos sobre los que incidir, que pueden ser los “objetivos” de propuestas concretas. La idea es que una propuesta concreta se trate una o varias de las ideas aquí expuestas. Se puede ver que dos de los objetivos (8 y 9) del currículo oficial de Madrid para Física de 2º Bachillerato pueden englobar algunas de ellas.

En estas propuestas sólo se habla sobre posible contenido, dejando abierta la metodología a cada concreción, aunque hay que pensar siempre en orientar a los alumnos de cara a un posible interés en ampliar conocimientos, dada la limitación temporal, remitiendo a recursos adicionales.

3.1 Historia de la Mecánica Cuántica

Lo esencial es no mostrar la MC como algo surgido y “cerrado” en comienzos de los años 20, sino mostrar que es algo que ha tenido y sigue teniendo mucha actividad. La clave de esta propuesta es ampliar la visión temporal mostrando hitos relevantes teóricos y experimentales a lo largo de todo el siglo XX y comienzo del XXI, y ver que es un campo abierto. Citando el currículo de nuevo:

*“Un correcto desarrollo de los contenidos precisa generar escenarios atractivos y motivadores para los alumnos, introducirlos, desde una **perspectiva histórica**, en diferentes hechos de especial trascendencia científica así como conocer la biografía científica de los **principales investigadores** que propiciaron la evolución y el desarrollo de la Física.”*

3.2 Aplicaciones de la Mecánica Cuántica

De nuevo citando la introducción del currículo de Física de 2º de Bachillerato *“industrias enteras basadas en las contribuciones de la Física que se proyectan sobre múltiples ámbitos de aplicación, como las telecomunicaciones, la instrumentación médica, las tecnologías de la información y la comunicación”*

Se trata de mostrar no sólo una visión teórica y ejemplos de experimentos, sino motivar viendo su enlace con aplicaciones reales y útiles. Se puede comenzar comentando que el conocimiento de la estructura del átomo es el punto de partida esencial de toda la electrónica, comentando otras aplicaciones ya existentes: láser, microscopios de efecto túnel, resonancia magnético nuclear.

Tras una visión de aplicaciones con recorrido histórico, se trataría presente y futuro, mencionando criptografía y computación cuántica, que es sencilla de introducir como extrapolación de la ley de Moore. Presentar el uso de compuestos químicos como computadores cuánticos puede ser algo que aporte flexibilidad en la manera de pensar en ellos. Habría que conseguir que viesen la tecnología, que es la aplicación práctica de la ciencia, como algo abierto y que puede seguir evolucionando.

Propuesta de puesta en práctica en el aula

En este enlace tecnología y ciencia, creo relevante comentar dos citas:

“The task is ... not so much to see what no one has yet seen; but to think what nobody has yet thought, about that which everybody sees” Schrödinger

“Information is physical” Landauer, 1961.

3.3 Cultura general sobre Mecánica Cuántica

Aquí propongo dar ideas básicas válidas para cualquier materia, sin entrar en detalles de conceptos que serían para estudiantes de ciencias. Para aproximarse a qué es la MC mostrando de manera muy general sus ideas, creo que sería útil comenzar introduciendo el experimento de la doble rendija, con un vídeo, donde sugiero esta animación de “Dr Quantum” disponible en muchos links:

http://teachertube.com/viewVideo.php?title=Dr__Quantum_Double_Slit_Experiment&video_id=50333

Una vez explicado y visto lo sorprendente, mencionar breve y cualitativamente muy pocas ideas básicas, sin entrar en detalles ya que esta propuesta no es de detalle como la de conceptos: Principio de incertidumbre, principio de complementariedad, observables y tratamiento probabilístico.

Se podría completar comentando ciertas citas:

“The double-slit experiment contains the only mystery of quantum mechanics. After we have unveiled the mystery, we will be able to understand quantum mechanics” Feynman.

“Estoy convencido de que Él (Dios) no juega a los dados” Einstein, carta a Born 1926.

“I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics” Feynman. *“Anyone who is not shocked by quantum theory has not understood it”* Bohr.

“There is no quantum world. There is only an abstract physical description. It is wrong to think that the task of physics is to find out how nature is. Physics concerns what we can say about nature...” Bohr

3.4 Transversalidad

Intento mencionar relaciones de la MC con otras disciplinas, que permitan incluso mencionarla puntualmente en otras materias. Sí que es relevante hacer ver a los futuros estudiantes de ingeniería e informática que no van a recibir una formación al respecto.

Por supuesto hay que empezar con las matemáticas, que tienen una gran presencia, pudiéndose mencionar dentro de los elementos conocidos a nivel preuniversitario la probabilidad, números complejos, cálculo matricial, funciones.

Dentro de tecnología, se puede relacionar con la computación y con comunicaciones (criptografía).

Respecto a filosofía, se puede enlazar con conceptos como realismo, positivismo, determinismo, relevancia de experimentos pensados “gedanken”.

En literatura se puede comentar su uso en ciencia ficción, que suele apoyarse en malas interpretaciones: el observador humano colapsa la función de onda (ejemplo “Cuarentena” Greg Egan), teleportación de estado se extrapola a teleportación de materia, comunicación instantánea.

3.5 Conceptos de Mecánica Cuántica

Esta propuesta está orientada a alumnos de Física, para intentar sentar bases firmes de conceptos al tiempo que descartar ideas erróneas:

Formulaciones de la MC: Tratamiento habitual sólo interpretación Copenhague, mencionar al menos también interpretación Bohm aunque sólo sea como motivador para Bell.

Interpretación probabilística de Born: las matemáticas de la física no representan lo que las cosas son, sino lo que medimos de ellas.

El problema de la medida: colapso y papel del observador.

Variables ocultas. Elements of Physical Reality de EPR, desigualdades de Bell. Realismo.

Descartar ideas erróneas: comunicación a distancia instantánea y teleportación.

4 Propuesta concreta

Por limitaciones de espacio no es muy detallada, ni se pueden incluir recursos materiales o actividades, que serían básicamente trabajos individuales de profundización. La idea es combinar la visión histórica con la historia de las aplicaciones, separándola en dos sesiones. Resumir toda la historia es ambicioso, pero el no profundizar demasiado al ser Bachillerato lo puede permitir. Se incluye la historia que “habitualmente” se comenta, ampliándola hasta nuestros días, marcando los hitos más relevantes y separando cuando es posible aspectos teóricos, experimentales y aplicación.

4.1 Sesión 1 : Historia de la Mecánica Cuántica


Se prepararía un material que serían una serie de transparencias con un “hilo temporal” desde el año 1900 hasta 2011, que se presentarían según los medios disponibles y se entregarían, comentándolas oralmente en orden cronológico. Se podrían intercalar algunas frases célebres asociadas a la MC.

Es un resumen, se podrían añadir muchas más cosas, pero intento recalcar premios Nobel, y no me centro en descubrimiento de partículas ni teoría cuántica de campos. Sobre cada entrada del hilo temporal se pueden añadir comentarios: por ejemplo reforzar que Einstein tuvo premio Nobel por efecto fotoeléctrico, que es MC, no por la relatividad, y que luego él, como muchos otros que contribuyeron a la MC luego eran críticos con lo que implicaba.

Fecha	Científico y teoría o hecho experimental relevante
<1900	Descubrimiento electrón, primeros modelos atómicos, consenso luz como onda
1900	Planck Hipótesis energía cuantizada >> Nobel 1918
1905	Einstein Efecto fotoeléctrico, fotones con energía cuantizada >> Nobel 1921
1913	Bohr Modelo atómico con órbitas circulares, energía cuantizada >> Nobel 1922
1922	Stern, Guerlach Experimento que muestra que el spín está cuantizado >> Nobel 1943
1923	Compton Efecto donde se observa naturaleza corpuscular luz >> Nobel 1927
1924	De Broglie Hipótesis que predice naturaleza ondulatoria de las partículas >> Nobel 1929 Bose, Einstein Proponen estado condensado de la materia
1925	Heisenberg, Born, Jordan Mecánica matricial, primera versión Mecánica Cuántica >> Nobel 1932
1926	Schrödinger Mecánica ondulatoria. Ecuación de onda >> Nobel 1933 Dirac Desarrolla Mecánica Cuántica que unifica lo hecho por Heisenberg y Schrödinger >> Nobel 1933 Born Interpretación probabilística función onda >> Nobel 1954
1927	Heisenberg Principio indeterminación Bohr (Born, Heisenberg) Interpretación de Copenhague (residencia Bohr) Principio de complementariedad Davison, Germer Difracción de electrones >> Nobel 1937
1932	VonNewman Fundamentos matemáticos MC. Demuestra erróneamente que no puede haber variables ocultas
1935	Einstein, Podolsky, Rosen Formulación paradoja EPR Schrödinger Formulación paradoja gato
1948	Casimir Propone efecto macroscópico
1952	Bohm Interpretación Mecánica Cuántica con variables ocultas no locales
1957	Everett Interpretación múltiples universos
1959	Aharonov, Bohm Proponen efecto entre potencial y función onda. Se observa en 1960 >> Premio Wolf 1998

1961	Jönsson Experimento doble rendija con electrones (electrón a electrón 1974 Merli y 1998 Tonomura)
1964	Bell Teorema: Con variables ocultas locales no se pueden reproducir las predicciones de la mecánica cuántica.
1982	Aspect Confirmación experimental desigualdades Bell que confirman Mecánica Cuántica es completa
1995	Cornell, Ketterle, Wieman Se consigue condensado Bose-Einstein predicho 70 años antes >> Nobel 2001
1996	Lamoreaux Medición experimental con precisión efecto Casimir (en 1958 Sparnaay con gran error)
2007	Aspect, Grangier, Roch Realización experimento elección retardada (propuesto 1978 por Wheeler)

4.2 Sesión 2 : Aplicaciones Mecánica Cuántica

1931	Ruska Microscopio electrónico >> Nobel 1986
1946	Mills Purcell, Bloch Resonancia Magnética Nuclear >> Nobel 1952
1948	Bardeen, Brattain, Shockley Inventan el transistor >> Nobel 1956
1957	Bardeen, Cooper, Schrieffer Teoría BCS para superconductividad con pares electrones >> Nobel 1972
1960	Maiman Primer láser (1958 Townes, Schawlow Teoría del láser)
1977	Damadian Primera RMN completa cuerpo humano
1980	Klitzing Efecto Hall Cuántico (Se usa en calibración resistencias desde 1990) >> Nobel 1985
1981	Bining, Rohrer Microscopio de efecto tunel >> Nobel 1986
1984	Bennet, Bassard Primer protocolo de criptografía cuántica.
1985	Deutch Teoría de computación cuántica
1991	Ekert Entrelazamiento para realizar criptografía cuántica
1993	Bennett Teletransporte cuántico. Comprobado experimentalmente en 1997.
1994	Shor Algoritmo cuántico de factorización números primos, que puede romper mayoría de sistemas criptografía actuales, lo que pone foco de atención en nuevos algoritmos y computación cuántica.
1995	Cirac  Zoller Propuesta ordenador trampa de iones. Implementado ese año. 1ª puerta lógica C-NOT.
1996	Grover Algoritmo cuántico de búsqueda DiVincenzo Propone lista de requisitos mínimos para un ordenador cuántico.
1997	Loss, DiVincenzo Proponen ordenador cuántico escalable de semiconductores con quantum dots. MIT Primer ordenador cuántico, disolución compuestos y RMN
1998	Oxford, IBM, MIT Primera demostración experimental de un algoritmo cuántico en ordenador 2qubit RMN
2000	Technical University of Munich Primer ordenador 5 qubit RMN Los Alamos National Laboratory Primer ordenador 7 qubit RMN.
2001	IBM Algoritmo de Shor ejecutado para factorizar el número 15.
2004	Id Quantique Primer producto comercial de criptografía cuántica
2005	University of Innsbruck Primer ordenador 8 qubit (1 qubyte)
2006	MIT 12 qubits
2007	NIST, Yale University Bus cuántico, se enlazan qubits con superconductores
2008	Universidades Alemania, Austria y China Almacenamiento cuántico Universidades Princeton, Oxford, Laboratorios Berkeley Almacenamiento en átomo más de 1 segundo
2009	Universidad Yale Primer procesador cuántico estado sólido Universidad Bristol Algoritmo Shor en chip fotónico de silicio NIST Lectura y escritura individual de qubits
2011	University of Innsbruck 14 qubits

En los últimos años la actividad es frenética, se trata de indicar algunos relevantes y papel universidades.