

# Doctor Manhattan: comprendiendo la mecánica cuántica desde el modelo atómico de Schrödinger

Juan David Ruiz<sup>1</sup>

Cómo citar este artículo:

Ruiz, J. D. (2023). Doctor Manhattan: comprendiendo la mecánica cuántica desde el modelo atómico de Schrödinger. *Pre-Impresos Estudiantes*, (22), 17-24.

## Resumen

El modelo atómico es un tema que se aborda en los colegios colombianos, pero no siempre se enseña desde la perspectiva de la física moderna. En particular, el modelo de átomo de Schrödinger no se lleva al aula, porque incorpora principios de la mecánica cuántica. Por ello, este trabajo ofrece una visión general de estos principios para estudiar el átomo de hidrógeno desde el modelo de Schrödinger, utilizando como eje central el personaje Doctor Manhattan de la novela gráfica *Watchmen* (Moore y Gibbons, 1986). A través del desarrollo narrativo y las características distintivas del personaje, se tiene la oportunidad de explorar los fenómenos que subyacen a la mecánica cuántica y contribuyen a una mayor comprensión de este modelo atómico específico. Así, el texto se divide en tres secciones en las que, a través de las escenas del personaje en la historia, se destacarán los principios que arrojan luz sobre el modelo atómico de Schrödinger.

**Palabras clave:** física moderna; mecánica cuántica; modelo atómico de Schrödinger; *Watchmen*

## Abstract

The atomic model is a topic covered in Colombian schools, but it is not always taught from the perspective of modern physics. In particular, Schrödinger's atom model is not brought into the classroom because it incorporates quantum mechanics principles. Therefore, this paper provides an overview of these principles to study the hydrogen atom from Schrödinger's model, using the character of Doctor Manhattan from the graphic novel *Watchmen* (Alan Moore, 1986) as the central focus. Through the character's narrative arc and distinct characteristics, a fascinating exploration of the phenomena that underlie quantum mechanics and a further understanding of this specific atomic model is achieved. Thus, the text is divided into three sections where the principles that shed light on the model of Schrödinger's atom will be highlighted through the character's scenes in the story.

**Keywords:** Modern physics; quantum mechanics; Schrödinger's atomic model; *Watchmen*

---

<sup>1</sup> Estudiante de Licenciatura en Física, Universidad Pedagógica Nacional. Ha sido monitor académico de las asignaturas de Electromagnetismo, Mecánica II y Cálculo diferencial. Docente de física en el proyecto "Pre-Icfe del pueblo para el pueblo" (2021). Interesado en la física de partículas. Jdruiz@upn.edu.co

## Introducción

El presente trabajo encuentra su motivación principal en la clase “Mecánica Cuántica II”, en la que, como proyecto final, se pidió solucionar el modelo atómico de Schrödinger para el átomo de hidrógeno. Para ello fue necesario entender los conceptos de mecánica cuántica primitiva para solucionarlo y, de allí, se afianzaron dichas temáticas, lo cual generó en el autor de este artículo un gusto por este modelo atómico para entender los temas de mecánica cuántica. Para su divulgación se escogió el comic de Alan Moore, *Watchmen* (Moore y Gibbons, 1986), novela gráfica de gran impacto en la cultura popular que se llevó al cine en 2009. Se decidió trabajar con este que este texto por la facilidad para llevarlo al aula y así hacer analizarlo desde la mirada científica en clase.

Para el análisis se utilizó al personaje Doctor Manhattan, dado que la ciencia juega un papel importante tanto en su arco narrativo como en sus poderes, por lo que, a partir de escenas de su historia en el comic se presentan fenómenos que dan pie a explicar los principios de la mecánica cuántica presentes en la comprensión del modelo atómico de Schrödinger.

Cabe señalar que el autor de la obra no solo creó a un personaje con un contexto entendible para los lectores de la época de su realización, sino que lo relacionó con el contexto social, pues tanto en la vida real como en la ficción, la sociedad norteamericana (y por consiguiente las poblaciones influenciadas por esta como la colombiana) sufrió de un gran impacto social por el uso de armamento nuclear, lo cual llevó al misticismo y temor de su uso y funcionamiento, tal vez inadecuado de la física nuclear, que terminaba desembocado en guerras nucleares. Algo que si bien sirvió de fuente de inspiración para personajes como Hulk o Capitán Átomo, dejó en la ciudadanía una serie de erróneas concepciones de la temática tanto nuclear como atómica. Si a esto se le agrega el hecho de que en los colegios de las sociedades influenciadas por estas posturas,

como la colombiana, se enseña la química y física desde modelos atómicos antiguos, esta idea del modelo atómico seguirá impregnada en la sociedad, tal como afirma José Luis Villaveces Cardoso (2001) en su texto *La enseñanza de la estructura de los átomos y de las moléculas*: “No hay derecho a que ochenta años después de realizados los principales avances en estos campos se mantenga a los colombianos ignorantes de ellos o se les den vulgares reemplazos llenos de inconsistencias y falsedades” (p. 6).

En este artículo se presentarán, a través del personaje Doctor Manhattan, las ideas más importantes de la mecánica cuántica para el entendimiento del átomo de hidrógeno y así contextualizar sobre el modelo atómico contemporáneo.

El texto se encuentra seccionado en tres apartados que definen los principios más importantes en este modelo atómico; en el primero se habla de la primera cuantización; analizando la creación de Doctor Manhattan y su primera aparición, se explica el concepto de cuantización de la energía y niveles de energía; en el segundo se habla de superposición y de cómo los poderes de este personaje ayudan a vislumbrar esta idea; finalmente, se propone una situación con el personaje para entender cómo funciona el átomo de hidrógeno de Schrödinger.

## Mecánica cuántica clásica

“¿Debe seguir mi hijo en este anticuado negocio?” “La ciencia atómica... ¡Eso es lo que el mundo necesita! ¡No relojes de bolsillo!” Recuerda Jonathan Osterman en 1985, tal vez estudiar física nuclear fue lo que orientó su destino hasta ser el ser más poderoso del mundo. Es 1958, Jonathan se gradúa de física en la universidad de Princeton y un año más tarde obtiene un empleo como investigador en experimentos con campos intrínsecos.

Moore y Gibbons, 1986.

Alan Moore presenta a Jonathan y a su padre como personajes afectados por su contexto,

dado que la bomba atómica representó un avance científico importante, debido a que simbolizó una cúspide en el entendimiento del átomo y el uso de la mecánica cuántica para ello. Además, propició a la sociedad americana de un impacto científico importante, siendo el personaje Doctor Manhattan un ejemplo de esto, ya que, de no ser por la bomba (en la historia) él seguiría los pasos de su padre. Pero continuó por el camino científico y terminó involucrado en investigaciones con física nuclear. Es así que, para entender la importancia de la mecánica cuántica en la formulación atómica que desembocó en la bomba atómica, se explicarán primero las bases propias que dieron cuenta de ello.

### *Cuantización de la energía*

Imaginen a Jon Osterman en la cámara de campos intrínsecos (lugar donde se estudia la física nuclear en la historia), siendo golpeado por radiación y desintegrándose, justo como se observa en la figura 1. Este es el inicio de Doctor Manhattan, pero ¿por qué al ser golpeado por radiación, Jon Osterman se desintegra? Para responder se plantea otra pregunta: ¿cómo es la interacción de la radiación con la materia? Con ello se introduce al pensamiento físico de comienzos del siglo xx.

**Figura 1. Doctor Manhattan siendo impactado por radiación**



Fuente: Moore y Gibbons (1986)

En lugar de situar al personaje en una habitación que emite radiación en todas direcciones, se plantea una representación más simple de la situación: un alimento en un horno microondas.

Se compara esta representación con la forma en que se solía pensar a principios del siglo xx. Según esta perspectiva, si se enfoca radiación (que se consideraba como luz en términos ondulatorios) en un punto, la cantidad de energía que se transmite dependerá de la frecuencia de esa radiación. Cuanta mayor sea la frecuencia, más energía se transmitirá al punto al que se dirige la radiación y, como resultado, el sistema interno (en este caso, el alimento en el horno microondas) se volverá más activo, lo que significa que sus componentes internos se moverán más, lo cual generará una mayor temperatura en el sistema y, por tanto, calentará el alimento. Entonces, se puede decir que Jon, al ser expuesto a una radiación altamente energética, recibió en su sistema interno tanta energía, que se produjo gran cantidad de movimiento en su interior hasta generar una temperatura muy alta que su cuerpo no soportó y, por ello, terminó calcinado.

Pero la cosa no acaba aquí, resulta que desde esta analogía, todo cuerpo irradiado tendrá un gran incremento en su temperatura, es decir, que al dar mucha radiación se obtendrá un efecto térmico de igual magnitud, pero al hacer esto en un objeto conocido como cuerpo negro (el cual es un cuerpo que tiene la capacidad de absorber la energía que se le da y la expulsa en forma de temperatura), el comportamiento exhibido no era regido por ello. El problema con este cuerpo radicaba en su funcionamiento, dado que, al ser irradiado en un punto, su temperatura resultante experimentalmente no coincidía con la esperada de forma teórica (Eisberg, 1974). Es decir que con esto se puede preguntar: si así no funciona la radiación, entonces, ¿por qué Jon es quemado por esta? Con la existencia de este cuerpo, Jon pudo haber sido irradiado y su temperatura no hubiera incre-

mentado de tal forma que hubiera salido ileso de la cámara.

Se llevaron a cabo varios estudios de este fenómeno, hasta que el científico Max Planck en 1900 encontró la solución y desde allí se empezó con el estudio de la mecánica cuántica, proponiendo la idea de una energía cuantizada. Hasta este punto, siempre que se trabajaba con energía, se manejaba con valores cualesquiera, donde la energía podía ser cualquier número real, pero Planck propone una energía propiciada en valores enteros de una energía mínima, donde esta dada por el valor de la frecuencia (valor de repetición de crestas en una onda) de la radiación por una constante, llamada *constante de Planck*,  $h$ , que será la constante que represente a todo trabajo en la mecánica cuántica (véase la ecuación 1). Por lo que, los objetos de los sistemas pequeños (que nos conforman) no aceptan cualquier valor de energía, aceptan solo una cantidad específica, nada más, nada menos. Entonces, en este experimento el cuerpo negro solo aceptaba ciertos valores de radiación y el resto lo despreciaba, dando la idea de que después de cierto valor de radiación este no se calentaría más, y produciría únicamente hasta cierto valor de incremento térmico. Con esto se puede decir que una de las razones por las que Jon terminara calcinado fue debido al valor de energía que tenía la radiación con la que interactuó, pues esta debió tener el valor necesario para producir un incremento de temperatura tal que resultó quemándolo.

$$E = nE_0$$

$$E_0 = hv \quad (1)$$

### *Niveles de energía*

Jon, después de ser calcinado y dado como muerto, empezó a aparecer por el laboratorio, como un fantasma, siempre en diferentes formas, como un sistema nervioso o un esqueleto, hasta que finalmente ante el asombro de sus

compañeros, apareció en forma de hombre con aura ultravioleta (figura 2).

*Figura 2. Primera aparición de Doctor Manhattan*



Fuente: Moore y Gibbons (1986).

“Sus rostros descoloridos me miraban fijamente. Pálidos y sin sustancia. En el repentino fulgor ultravioleta” (Moore y Gibbons, 1986). Aquí se hace necesario plantear la pregunta ¿cómo funciona su aura ultravioleta? Y es que la forma en la que se perciben los colores se puede explicar conociendo un poco más del mundo subatómico. Hay que tener en cuenta que el mundo está compuesto de diferentes elementos que se distinguirán unos a otros por la cantidad de partículas que tengan sus átomos, es decir, qué tantos protones/electrones tiene, y estos interactuarán de forma distinta con la radiación. Como se dijo anteriormente, la radiación, únicamente a partir de un valor específico, hará que estos átomos y, por lo tanto, las partículas que lo conforman, se muevan más. Por lo que, los colores serán el resultado de dicha interacción. Dependiendo del elemento químico, al interactuar con la radiación, este tomará solo cierto valor de energía de la luz (la que acepta), que lo hará mover un poco y al devolver el

resto (que no acepta), esta radiación tendrá una característica diferente, perderá cierta energía y su frecuencia también, por lo que el color será dado por dicha frecuencia. Es así como se puede concluir que el color de Jon al volver a la vida se da porque es un ser hecho de un elemento diferente a nosotros, pues al interactuar con la luz, resulta este color ultravioleta.

En este punto entran en juego los modelos atómicos; si bien se habla de que todos los elementos están conformados por átomos, ¿cómo se pueden imaginar? Y ¿cómo pueden dar cuenta de lo antes explicado? Estas son otras de las preguntas base de la mecánica cuántica, sobre las cuales se tardó mucho tiempo en dar respuesta. Para exponer un pequeño recuento histórico, desde la antigüedad se creía que todo objeto estaba constituido de un objeto primordial, el átomo; y tiempo después, con el desarrollo en el campo de la electricidad, el concepto de que todo objeto estaba cargado de manera neutra abrió más esta idea al proponer que este objeto primordial debía dar cuenta de ello. Por lo que, al hablar sobre átomos, siempre se tomó en cuenta la idea de una carga neutra, sin embargo, estas propuestas no podían dar cuenta de algo, *el espectro electromagnético*. Este es un descubrimiento hecho para describir los elementos de cualquier objeto teniendo en cuenta la luz descompuesta de este. Es decir que todo elemento va a tener un espectro propio y este se comprueba al proponer una interacción del elemento con radiación, para después descomponer esta radiación. Para dar noción de una descomposición de luz, se puede proponer una luz blanca pasando por un prisma haciendo que este salga de diferentes colores (siendo estos el espectro). Por lo que, si se pudiera poner un prisma en frente de Jon para descomponer la luz que el emite, se sabrían sus elementos constituyentes (del Mazo Vivar *et al.*, 2020).

Es, entonces, que a comienzos del siglo xx el científico Niels Bohr dio con la propuesta de un átomo que explicaba al espectro, convirtiendo

a esta propuesta en la que más comúnmente se relaciona con la imagen de un átomo. Cabe aclarar que Bohr hace este modelo pensando en el espectro del elemento de hidrógeno que es el elemento más “sencillo” que existe, pues está compuesto de un protón y un electrón, y así mismo se puede considerar como el más “importante” con el cual se forman los compuestos que generan la vida en el planeta Tierra. Aquí, Bohr propuso que el electrón orbita alrededor del protón en una forma circular a una distancia específica del núcleo, pero este, al interactuar con la radiación, con la porción que acepta, hace que se mueva, a lo que él denominó un nuevo *nivel de energía*. Este nivel se puede ver como otra trayectoria circular, pero que se encuentra a un radio más grande, donde el electrón, al cambiar de órbita, expulsa radiación que no acepta, y así da cuenta del espectro. Como aspecto final, se puede decir que Jon toma como símbolo esta imagen de modelo atómico del hidrógeno como símbolo superheróico, dada la simplicidad del modelo y la capacidad con la cual se explica el elemento más sencillo e importante de todos.

## Comportamiento cuántico

Desde el momento en que renació, Jon se convirtió en estandarte para el país norteamericano, no solo por sus habilidades sobrenaturales de alterar toda clase de materia, tanto propia como externa, sino, por su ayuda en la guerra de Vietnam en la que se encontraba el país, y con ayuda de sus poderes, el país, en esta realidad, logra ganar la guerra. Y es en este punto donde no solo se resalta el poder de manipulación de la materia que tiene el personaje, sino, su forma de percibir el tiempo, pues Jon, o mejor conocido como Doctor Manhattan, se encuentra viviendo cada momento de su vida a la vez.

**Figura 3. Doctor Manhattan situado en dos lugares del tiempo a la vez**



Fuente: Moore y Gibbons (1986).

Dicho superpoder parece muy confuso, ¿cómo se puede estar en un lugar y a la vez en todos los lugares en el mismo instante de tiempo? Esta pregunta se puede responder con una de las características del mundo subatómico. Y es que en el auge del estudio, desde el modelo Bohr se planteó un experimento para comprobar cómo se comportaban los electrones en un campo magnético. Aquí se proponía que, para elementos con un solo electrón en el último nivel de energía, al ser sacado de su órbita por interacción con radiación, era movido a un imán, donde interactuaba con el campo magnético y finalmente llegaba a una placa para ver qué había pasado con él y así se podría saber cómo era su comportamiento. El resultado dio con una distribución 50/50, es decir, los electrones solo cayeron en dos lugares específicamente, y al tomar solo un punto entre los dos para repetir el proceso, el resultado fue el mismo, los electrones al interactuar con un campo magnético se encontraban en dos lugares a la vez hasta realizar una medida que los ponía en lugar o en otro. Con este estudio, se dio cuenta de dos

cosas: la primera, que había una propiedad intrínseca de las partículas llamada spin, que define la interacción entre estas con el campo magnético, donde se puede destacar que si bien existen propiedades intrínsecas, es decir, propiedades que son inertes, que solo se reconocen al ser expuestas a ciertas circunstancias, como la masa por efectos de la gravedad o la carga por un campo eléctrico, los campos intrínsecos como los que buscaba Jon antes de convertirse en Doctor Manhattan, son un invento del autor, basado en la hipótesis de un campo universal que debe denotar la unión entre todas las cosas; y, la segunda, que con este experimento se comprobaba un comportamiento probabilístico en las partículas.

Para ejemplificar se puede proponer al Doctor Manhattan en dos eventos específicos, el primero siendo el personaje en el planeta Marte, y el segundo en el asesinato del presidente John F. Kennedy. Ahora, el lector decide si el Doctor está en uno u otro evento siempre y cuando lo esté observando allí, es decir, que está en Marte cuando el lector lo vea allí o en el asesinato de la misma manera. Pero cuando esté pasando de página o esté en una viñeta donde el personaje no esté, en ese momento Doctor Manhattan estará en ambos lugares al mismo tiempo, porque lo está, y no está hasta que el lector elija la página, ya que este no se decidirá por uno u otro evento. Así, el poder del Doctor Manhattan le permite ser actor y director de su propio personaje dentro de su historia, vivirá todos los momentos de su vida a la vez y no es hasta que él decida poner su concentración en alguno específico, que seguirá viviendo así.

Viendo a las partículas de esta manera, entonces, ¿por qué se pueden estudiar de carácter tan concreto para predecir resultados? Esto se logra por medio de la *energía*. Como se ha hablado durante todo el artículo, si bien las partículas tienen un comportamiento que se puede denominar probabilístico, su energía mínima para interactuar con la radiación y sus niveles de energía seguirán siendo los mismos.

Por lo que, en su forma matemática esta descripción del comportamiento a nivel subatómico se dará por medio de la ecuación de Schrödinger (véase la ecuación 2)

$$H|\psi\rangle = E|\psi\rangle \quad (2)$$

En esta ecuación, se ve cómo la suma de energías de la partícula debe ser igual a la energía de esta. Con lo que se puede asegurar que, si bien Doctor Manhattan puede estar en diversos lugares a la vez, su energía debería ser la misma.

## El átomo de Schrödinger

Finalmente, como se decía previamente, si las partículas están en varias posiciones a la vez, así como Doctor Manhattan, entonces, ¿cómo el átomo de Bohr se acopla a ello? Ante esta incógnita, Erwin Schrödinger, en 1926, propone un modelo atómico con el elemento del hidrógeno para otra vez dar cuenta de este fenómeno y los otros. Nuevamente se proponen las mismas partículas, protones y electrones, donde estos se mueven de forma circular alrededor de los protones. Aquí se tiene que considerar que el protón hará un efecto sobre el electrón igual que el electrón sobre el protón al moverse, por lo que, aunque no se puede saber dónde están las partículas, estos efectos seguirán estando, además, es de considerar que el medio puede afectar también, pero no se considerará nada más que el electrón y su efecto sobre el protón y viceversa. igualmente, se considerará que ambas partículas tienen una energía de movimiento. Se puede considerar a dos doctores Manhattan en un mismo espacio, pues, no obstante ambos están y no hasta perturbarse en una posición dada, hay un efecto de uno al otro, pero no se considerarán factores externos, más allá de ellos dos.

Hasta este punto en forma matemática solo se ha trabajado con la parte izquierda de la ecuación 2, pero ¿qué pasa con la del lado derecho? Aquí se tiene que hablar de cómo es la energía del sistema, pues dependiendo de cómo es esta energía, se tendrán diversos resultados, como

en el que el electrón saldrá volando del átomo, es decir, que tendrá más o menos energía, pero se requiere una energía en donde quede orbitando al núcleo o protón. Como si en el caso de los dos doctores Manhattan, uno únicamente pasara al lado del otro y no se quedaran en el mismo espacio, haciendo que no haya un sistema como tal.

Con estas consideraciones, y al realizar la matemática asociada, se llega a que la energía para este caso también está cuantizada, es decir, variará dependiendo del nivel de energía en el que se encuentre el electrón, por lo que, al igual que en el de Bohr, la partícula se moverá en un nivel de energía donde al interactuar de manera correcta con radiación esta se moverá de nivel, pero se tendrá en cuenta que la partícula no tendrá un lugar definido. Es decir, que en el caso de los dos doctores Manhattan estos tendrán una energía definida a una distancia entre ellos pero que, al dar un poco de energía con radiación, si es la apropiada se moverá a una distancia más grande (véase ecuación 3).

$$E_r = \frac{(Z^2 \mu e^4)}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2} \quad (3)$$

La ecuación explica que la energía en el átomo está cuantizada, pues dependiendo de su orbital este tendrá una energía distinta. Además, es de resaltar que si bien no se sabe en qué parte están las partículas, desde este modelo se dan las zonas de donde es más probable encontrarlas, en lo que se conoce como orbitales. Es decir, que en el ejemplo de los dos doctores, aunque no se sabe dónde están puestos estos dos, hay zonas donde es más probable encontrarlos.

## Reflexiones

El personaje de Doctor Manhattan ayuda a entender el modelo atómico de Schrödinger, pues su creación ilustra el concepto de cuantización de la energía, su apariencia la idea de niveles de energía y sus poderes el tema de superposi-

ción. Temáticas que en conjunto ayudan a entender las bases del modelo atómico que requiere de mecánica cuántica para ser concebido.

Se puede decir que tanto en su simbología heroica como las bases que dan le dan su origen y características, el Doctor Manhattan se remonta a una explicación desde la mecánica cuántica clásica, además, representa con ellas uno de los avances más significativos de la física moderna, la idea de un constituyente probabilístico que se da a entender de elementos energéticos, con el cual se explican tantos fenómenos clásicos como modernos, como la idea atómica que propone Schrödinger.

Con respecto al análisis se puede denotar que para entender este modelo atómico se necesita primordialmente de tres conceptos clave: la cuantización de la energía, su relación con los modelos atómicos y el concepto de superposición antes y después de una medida. Por lo que, el personaje de Doctor Manhattan ayuda a esclarecer estas temáticas.

Complementando lo anterior, se puede decir que con Doctor Manhattan se puede mitigar la descontextualización señalada por Villaveces Cardoso (2001) en su texto, pues con este personaje se pueden relacionar estas temáticas poco llevadas al aula de clase y que son de vital importancia si se quiere enseñar los modelos atómicos más actuales.

Finalmente, se puede resaltar que si bien la mecánica cuántica es una rama de la física con

un formalismo riguroso no muy fácil de exponer desde condiciones cotidianas, algunas de sus expresiones y sobre todo su análisis conceptual pueden ser explicados desde objetos de la cotidianidad vistos desde una perspectiva científica, como es el caso del comic de Watchmen (Moore y Gibbons, 1986), una novela gráfica que ha impregnado la cultura popular al ser vista desde la perspectiva científica, lo que la convierte en una herramienta para explicar fenómenos de la mecánica cuántica.

## Referencias

- Del Mazo Vivar, A. M., Velasco Maíllo, S. y García-Molina, R. (2020). Recomposición de un rayo de luz blanca descompuesto por un prisma. *Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las ciencias*, 17(3), 340201-340209. [https://doi.org/10.25267/Rev\\_Eureka\\_ensen\\_divulg\\_cienc.2020.v17.i3.3402](https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2020.v17.i3.3402)
- Eisberg, R. (1974). La radiación térmica y el origen de la mecánica cuántica. *Fundamentos de Física Moderna* (pp. 51-76). Limusa.
- Moore, A. y Gibbons, D. (1986). *Watchmen*. 4. DC Comics.
- Villaveces Cardoso, J. L. (2001). La enseñanza de la estructura de los átomos y de las moléculas. *Tecné, Episteme y Didaxis: TED*, (9), 1-11. <https://doi.org/10.17227/ted.num9-5628>