



# Indagación y modelización del núcleo atómico y sus interacciones

Jordi Solbes  
Paula Tuzón  
Universidad de Valencia

*La modelización y la contextualización son claves en la enseñanza y el aprendizaje socioconstructivista. El objetivo de este artículo es presentar una actividad de modelización del núcleo atómico que ponga en duda el modelo nuclear clásico y haga ver la necesidad de un modelo basado en partículas elementales. Esta modelización la realizan los alumnos «personificando» las partículas y recurriendo al contexto histórico en el que aparecieron los nuevos modelos basados en partículas.*

## **Inquiry and modelling the atomic nucleus and its interactions**

*Modelling and contextualising are key elements in the socio-constructivist learning and teaching process. The goal of this paper is to present a modelling activity for the atomic nucleus that questions classical nuclear models and shows the need for a fundamental-particle-based model. This modelling is performed by the students actually embodying the particles themselves within the historical context in which the new particle-based models appeared.*

Palabras clave: modelización, personificación, núcleo atómico, interacciones, actualización de conocimientos.

Keywords: modelling, embodiment, atomic nucleus, interactions, updating knowledge.

## ■ Modelización y personificación

La modelización en el proceso de enseñanza-aprendizaje de las ciencias experimentales se presenta como una estrategia capaz de asegurar un aprendizaje significativo (Acher, Arcà y Sanmartí, 2007). Dentro de la perspectiva socio-constructivista, en que la enseñanza intenta aproximarse a la actividad científica con los alumnos trabajando en grupo en la indagación de un determinado fenómeno, la estrategia de modelización aparece como un

En el proceso de modelización en las ciencias experimentales se pone en evidencia la importancia de las dificultades de aprendizaje del alumnado (preconcepciones, formas de razonamiento y actitudes y valores previos)

punto clave, ya que también lo es en la actividad científica cotidiana. El modelo (Van Driel y Verloop, 2002) parte de la imposibilidad de medir o ver directamente el objetivo de estudio; la estrategia se basa en construir una idea que necesariamente ha de estar relacionada con el fenómeno real, donde tanto semejanzas como diferencias han de ser fácilmente identificables. Las primeras han de servir al investigador para emitir hipótesis del modelo que sean contrastables durante el símil-estudio del fenómeno. Las segundas

El enfoque de modelización considera que la enseñanza de temas actuales de física como los quarks y las interacciones nucleares puede contribuir a reducir la actitud negativa que tienen los alumnos ante la física

hacen que el modelo sea más accesible para la investigación que el fenómeno real (se intenta que el el modelo sea lo más simple posible). El desarrollo del modelo se concibe como un proceso iterativo, en el que se incluye la revisión tras la obtención de datos experimentales relacionados con el fenómeno objetivo.

En todo este proceso se pone en evidencia la importancia de las dificultades de aprendizaje del alumnado (preconcepciones, formas de razonamiento y actitudes y valores previos) (Solbes, 2009). Al partir tanto de la observación del fenómeno como de modelos (ideas) previamente elaborados, el nuevo modelo aparece de manera constructiva y solo se acepta tras la revisión de los conflictos con las versiones anteriores y no por imposición externa del profesor (estrategias de emisión-recepción).

El proceso de modelizar no solo se da desde la investigación actual que realiza un determinado grupo de trabajo sobre un fenómeno, sino que ocurre a lo largo de la historia de la ciencia. Uno de los ejemplos más paradigmáticos es la evolución de los modelos atómicos desde las primeras ideas de Dalton sobre la composición atómica de la materia hasta las modelizaciones más concretas de Thomson, Rutherford, Bohr, Sommerfeld, Schrödinger..., tan comentadas en los libros de texto (Solbes, Silvestre y Furió, 2010). Sea desde la perspectiva de un determinado grupo de investigación o a lo largo de la historia, es evidente la influencia del contexto en el

proceso mismo de modelización, tanto por los recursos técnicos del momento como por la existencia de modelos coetáneos que reafirmen o cuestionen algunas hipótesis de un determinado modelo.

No es el objetivo de este estudio introducir los conocimientos sobre el átomo, el núcleo y sus interacciones a través de las distintas modelizaciones mencionadas en el párrafo anterior, sino construir, a partir de estas concepciones *clásicas*, el nuevo modelo nuclear basado en el panorama actual que ofrece la física de partículas.

Este proceso de modelización está dirigido a estudiantes de bachillerato dentro de las asignaturas de física y química o física. Partiendo del electrón, el protón, el neutrón y su interacción electromagnética (modelos que aquí llamamos *clásicos* y que son los que normalmente se presentan en los libros de texto), se introducen los quarks y las interacciones nucleares (en particular, la fuerte) como componentes necesarios para solventar los límites de los modelos antiguos. En favor de este enfoque se considera que la enseñanza de temas actuales de física puede contribuir a reducir la actitud negativa que tienen los alumnos ante la física (Solbes, 2013).

Para ello, dentro de la estrategia de la modelización, hacemos uso de un proceso de personificación (*embodiment*) en el que los alumnos

La clave del éxito de la personificación radica en la activación física de un gran número de neuronas sensor-motoras de una manera tal que sea congruente con el concepto que se esté aprendiendo lo que propicia un aprendizaje mucho más profundo que el que se logra con la mera observación

mismos son los agentes activos del modelo que proponen. La personificación se presenta hoy en día como una estrategia exitosa en combinación con nuevos recursos informáticos interactivos (programas que reproducen en pantalla el movimiento vía sensores). La eficacia de esta estrategia en el aprendizaje ha sido demostrada en campos como la neurociencia, la psicología cognitiva, las matemáticas y la física (Lindgren y otros, 2012). La clave de su éxito radica en la activación física de un gran número de neuronas sensor-motoras de una manera tal que sea congruente con el concepto que se esté aprendiendo (Lindgren y otros, 2012), lo que propicia un aprendizaje mucho más profundo que el que se logra con la mera observación. Además, la interacción con el grupo (con otros agentes) es un valor añadido a este tipo de «activación congruente», sobre todo en cuanto a la aparición de propiedades emergentes. Por tanto, el concepto de personificación se extiende al de «personificación y colaboración».

### ■ Diagnóstico sobre el conocimiento del modelo atómico actual

El análisis de libros de texto pone de manifiesto que en ellos no se presenta el modelo atómico actual, basado en el modelo estándar de la física de partículas, y con los quarks y las interacciones fuerte y débil en el núcleo atómico como nuevos ingredientes. Sí se hace un planteamiento «moderno» del electrón en el tema de la estructura atómica, que no tiene tanto el objetivo de presentar un modelo atómico actualizado como el de introducir la idea de número cuántico y orbital ( $s, p, d, f$ ) para, de ahí, poder hablar de configuración electrónica, estructuras de Lewis y enlaces químicos. También en elementos de física cuántica del 2.º curso de bachillerato se habla

Nuestra hipótesis es que la concepción del alumnado ante el modelo atómico se limitará a la de los modelos clásicos, donde, en general, no se habrán puesto en evidencia los límites de estos de cara a futuras perspectivas

de la dualidad del electrón, pero no se lo caracteriza como objeto cuántico (Sinarcas y Solbes, 2013). Aunque en algunos libros de texto se mencionan las cuatro fuerzas fundamentales cuando se introducen las fuerzas, muy pocas veces se describe la fuerte y la débil si no es de manera muy sucinta y en casi ningún caso se establece relación alguna con el modelo atómico presentado en el mismo libro. Con todo, la versión del átomo, el núcleo y las interacciones fundamentales aparece desactualizada, los conceptos están incompletos e inconexos. Frente a este problema, nuestra hipótesis es que la concepción del alumnado se limitará a la de los modelos clásicos, donde, en general, no se habrán puesto en evidencia los límites de estos de cara a futuras perspectivas.

Para constatar esta hipótesis, aprovechamos algunos de los resultados de un estudio de diagnóstico que elaboramos sobre los conocimientos y actitudes del alumnado de primero de bachillerato en relación con la física de partículas (Tuzón, 2014). Por su relevancia para el presente trabajo, destacamos cinco de las preguntas de dicho cuestionario:

- P1. ¿De qué está hecha la materia?
- P2. ¿Qué tipos de fuerzas fundamentales hay en la naturaleza?
- P3. ¿Qué fuerza mantiene el electrón unido al núcleo atómico?
- P4. Si los protones tienen la misma carga

eléctrica, ¿por qué pueden estar tan juntos en el núcleo atómico sin repelerse?

P5. ¿Qué partículas crees que se han descubierto?

Evaluamos las respuestas según tres niveles, *bajo*, *medio* y *alto*, donde *bajo* significa que la respuesta no está al nivel de los conocimientos de los modelos atómicos clásicos; *medio*, que aporta ideas relacionadas con este nivel, y *alto*, que expresa conocimientos sobre el modelo atómico más actualizado. En las preguntas P1, P2 y P5 las frecuencias de respuestas se ajustan a un nivel medio de conocimientos; normalmente responden que la materia está hecha por átomos (P1), mencionan la fuerza electromagnética y la gravedad (P2) y citan el electrón, el protón y el neutrón (y en algunos casos alguna partícula más) como partículas que se han descubierto (P5). Sin embargo, las preguntas P3 y P4 muestran un nivel bajo de conocimientos. Esto es esperable de la pregunta P4, que pone al límite los modelos clásicos, y sin más información que la que ofrecen sus libros de texto el alumnado no puede dar respuestas tentativas en la dirección correcta. La pregunta P3 es la que más llama la atención, ya que prácticamente un 80% de las respuestas no hacen referencia a la fuerza eléctrica o electromagnética.

Queremos destacar ahora los porcentajes de algunas categorías de respuestas. Por ejemplo, en la pregunta P2 un 20% no menciona ninguna de las cuatro fuerzas fundamentales, mientras que un 40% menciona únicamente la gravedad (en la mitad de estos casos se mencionan otras que no son fundamentales). En la pregunta P3, como hemos destacado antes, solo un 20% de las respuestas se refieren a la fuerza electromagnética; el resto de los casos hacen referencia a la fuerza de la gravedad o a una «fuerza de atracción». En la pregunta P4, solo alrededor

En tres de las cinco respuestas se detecta un nivel medio de conocimientos relacionado con el modelo atómico más actualizado, y en otros dos casos se indica un nivel bajo

de un 8% de los casos hacen referencia a la existencia de gluones o una fuerza nuclear más fuerte que la eléctrica. El 50% de los casos se divide en dos grupos: aquellos que responden que la carga de los protones se «cancela» con la de los electrones (un 10%) y aquellos que responsabilizan (de diferentes maneras) a los neutrones de la no repulsión de los protones (el 40% restante). Hemos considerado estas dos respuestas prototípicas y las analizaremos en la fase de intervención. A la pregunta P5 un 25% responde electrón, protón y neutrón; un 20%, el Higgs; un 8% menciona estas y algunas partículas más, y alrededor de un 40% no sabe o no menciona ninguna.

## ■ Modelizando el núcleo atómico

Para la construcción de un modelo atómico basado en la física de partículas, proponemos la siguiente intervención basada en modelización con personificación. Dicha intervención la llevamos a cabo con 30 estudiantes y a continuación comentamos sus resultados cualitativos.

## ■ Partiendo del conocimiento del alumnado

Se les propone una primera actividad que conecta con los conceptos de los modelos clásicos que ya conocen, ingredientes que sirven de punto de partida.

### **Actividad 1: Dividíos en tres grupos: electrones, protones y neutrones. Moveos por la sala siguiendo las consignas de la profesora**

Tras la distribución en electrones, protones y neutrones, la profesora pide que interactúen las distintas partículas (los alumnos), primero las de un mismo grupo entre ellas y luego entre los distintos grupos. Las partículas (los alumnos) se mueven por la sala y solo interactúan con otras cuando se encuentran a cierta distancia (sin que sea necesario llegar a chocar); este «acercamiento» lo establecen los propios alumnos. Las conclusiones de esta actividad son las siguientes:

1. Cuando se encuentran dos partículas con la misma carga eléctrica, se repelen.
2. Cuando se encuentran dos partículas con distinta carga eléctrica, se atraen.
3. Los protones y los electrones tienen cargas eléctricas opuestas.
4. Los neutrones no tienen carga eléctrica y pasan impasibles por toda la sala, sea cual sea la partícula que esté a su alrededor.

### **Actividad 2: Con estos mismos ingredientes (electrones, protones, neutrones e interacción eléctrica), construid un átomo**

Los alumnos cogen, por ejemplo, un par de protones y un par de neutrones (alumnos) y los colocan juntos en un núcleo, cogen un par de electrones y los ponen a girar alrededor. Un aspecto interesante es que de manera «preventiva» los alumnos escogen la misma cantidad de protones que de neutrones y también de electrones; es un buen momento para tratar las diferencias entre número másico y número atómico, y entre iones e isótopos. El átomo eléctricamente neutro ha de tener la misma cantidad de protones que de electrones, pero esto no implica nada para los neutrones. Por otra parte, surge inmediatamente la cuestión de si las cargas opuestas «se pegan» u orbitan unas alrededor de las otras. Si en la actividad A1 los protones y electrones quedaban pegados al encontrarse, ahora los segundos orbitan alrededor de los primeros; merece la pena comentar que se trata del mismo tipo de interacción, con la única diferencia de la existencia de una velocidad en un eje diferente a la recta que une al protón y al electrón (se puede aprovechar para establecer una analogía con la interacción gravitatoria). También es un buen momento para dejar claro que el modelo propuesto no está a escala; vale la pena mencionar cómo habría de ser la representación para respetar la proporcionalidad entre las distancias.

### **Actividad 3: Si los protones tienen la misma carga eléctrica, ¿por qué pueden estar tan juntos en el núcleo sin repelerse?**

Esta actividad pretende poner en evidencia los límites del modelo que se acaba de construir. Con el átomo tal y como está representado por los estudiantes con sus propios cuerpos, se les pide que intenten explicar, utilizando esos mismos ingredientes, por qué los protones del núcleo no se repelen, cuando en la actividad 1 a «las mismas distancias» sí habían considerado su repulsión. Normalmente surgen tres respuestas de interés que, como hemos comentado más arriba, se han detectado también en el cuestionario de diagnóstico. Dos de ellas (a y b) muestran una falta de comprensión de la interacción electromagnética; la tercera (c) tiene sentido «físico», aunque queda descartada por el alcance de esta interacción.

- a) La carga de los protones queda «compensada» por la existencia de los electrones que orbitan alrededor del núcleo (el número de electrones es igual al número de protones en un átomo neutro), por tanto a los protones «no les queda carga» para repelerse entre sí.
- b) Los neutrones «neutralizan» o «absorben» la carga de los protones.

En ambos casos, los alumnos conciben la carga como un fluido que «se gasta» o «se absorbe». Hay que aprovechar estas reflexiones para descartar estas ideas y debatir cómo ocurre en realidad. Pueden aprovecharse los resultados de la actividad 1 a modo de contraejemplo; allí las cargas que se movían libremente no «perdían» su capacidad de interacción por la presencia de otras cargas contrarias más alejadas. En particular, la respuesta *b* pone de manifiesto otra contradicción: si los neutrones no tienen carga eléctrica y, por tanto, no interactúan eléctricamente (en la actividad 1 pasaban impasibles por la sala independientemente de la presencia de otras partículas cargadas), ¿por qué van a absorber o neutralizar carga positiva de los protones? ¿No son estas acciones maneras de interactuar? Es importante abrir el debate y contrastar ideas; al final se llega a la conclusión de que los neutrones no participan de ninguna manera (conocida por los alumnos hasta el momento) en la no repulsión de los protones en el núcleo.

Es importante hacer referencia a actividades anteriores, como la actividad 1, para poner de manifiesto la importancia de la coherencia en la construcción de un modelo. Es posible que surja la duda de que sea la actividad 1 la que está mal hecha; en este caso merece la pena rehacerla e intentar llegar a nuevas conclusiones. La respuesta *c*, por otra parte, propone colocar los neutrones entre los protones, añadiendo distancia física entre ellos; el argumento es que como la fuerza eléctrica decae con la distancia, los protones no notan la repulsión porque están «lo suficientemente lejos» gracias a la presencia de neutrones. Aunque es interesante, esta idea queda anulada inmediatamente al ver que los electrones, estando mucho más lejos, sí

Es importante poner de manifiesto la importancia de la coherencia en la construcción de un modelo

sienten la fuerza de atracción; se puede debatir además sobre el alcance de la interacción eléctrica comparándola con el radio de los neutrones.

Tras esta primera tanda de actividades, se concluye que con los ingredientes que nos proporciona el modelo atómico que tenemos hasta ahora no es posible responder de manera adecuada a la cuestión que plantea la actividad 3.

### ■ Incorporando el contexto histórico

Dejando abierta la actividad 3, es un buen momento para recurrir al contexto histórico en que aparecieron los nuevos modelos basados en física de partículas. Esto pone de manifiesto la importancia de la contextualización en el proceso de modelización; los modelos no se hacen de manera aislada, sino que responden a los ingredientes del contexto histórico o social.

**Actividad 4: Ved el vídeo descriptivo. Los físicos encuentran un «zoológico» de partículas, igual que años antes los químicos se encontraron con un «zoológico» de elementos. ¿Qué hicieron unos y otros? ¿Cómo explicaron esa diversidad de partículas y de átomos, respectivamente?**

El vídeo (CERN/ATLAS, 2010) se completa con un texto en el que se habla de la detección, a partir de los rayos cósmicos, de un gran número de partículas (hadrones) a principios del siglo xx: piones, deltas, sigmas y otras muchas, además de protones y neutrones. Se invita a los alumnos a establecer una analogía entre la conclusión a la que llegaron los químicos al ver tantos elementos químicos (litio, sodio, potasio, mercurio, etc.) y la disyuntiva a la que se enfrentaron los físicos a principios del siglo xx. Los químicos llegaron a un modelo más sencillo, basado en la existencia de electrones, protones y neutrones, que explicaba la diversidad de elementos observados. Esto facilita que los alumnos mismos lleguen a la conclusión de que se puede proponer que todas esas partículas estén formadas por otros componentes, combinados de distinta manera. La profesora presenta los seis quarks (una «tabla periódica» más elemental), cuyas combinaciones por parejas o tríos explican la diversidad de hadrones encontrados a partir de los rayos cósmicos.<sup>1</sup>

## ■ Construyendo un nuevo modelo

**Actividad 5: Construid de nuevo un núcleo atómico, pero ahora teniendo en cuenta que los protones están formados por quarks (dos quarks *up* y uno *down*), que no sabemos cómo interaccionan. ¿Cómo tendrían que interaccionar para explicar que los protones puedan estar juntos sin repelerse?**

Los alumnos representan ahora un protón con tres personas (quarks), donde cada una coge del hombro a la de la izquierda, de manera que quedan unidas pero con libertad de movimiento entre ellas y con una mano libre. Acercando dos protones representados de esta manera, se insta a los alumnos a que estas nuevas partículas (los quarks) «hagan algo» para mantener los protones unidos evitando su repulsión. De manera natural los quarks de un protón cogen de las manos a los quarks de otro protón. Se presenta así un nuevo modelo atómico en el que existe otra fuerza diferente entre los protones, más fuerte que la electromagnética: la fuerza fuerte.

Es importante tratar algunas características de esta nueva fuerza. Por ejemplo, que se da principalmente entre los quarks que están más cerca, es decir, los que forman un mismo protón; así como su corto alcance. De manera complementaria se puede hablar de libertad asintótica y confinamiento aprovechando el ejercicio de tener que estar cogidos (confinados) pero cierta libertad de movimiento si se acercan entre sí (libertad asintótica). Hay que explicar también que la fuerza que los alumnos representan entre los quarks de dos protones diferentes tiene un carácter «residual» (analogía con las fuerzas de Van der Waals). Y finalmente hay que poner de manifiesto el papel de los neutrones en la estabilidad del núcleo atómico, que se entiende ahora también a par-

tir del nuevo modelo de quarks. Como los neutrones están compuestos por quarks, igual que los protones, los quarks de estos también contribuyen a que los protones no se repelen; por eso, típicamente, los átomos con más protones tienen también más neutrones (eléctricamente no hay ninguna razón que explique este fenómeno), aunque no necesariamente en igual proporción.

## ■ Conclusiones

Dar acceso a los alumnos a una versión actualizada del modelo atómico en consonancia con el panorama actual de la física de partículas nos parece clave en su proceso de aprendizaje y de cara a una alfabetización científica (Solbes, 2013). Aprovechando los recursos que nos ofrece el currículo de bachillerato dentro de la asignatura de física y química, hemos propuesto la construcción de esta versión actualizada utilizando técnicas de modelización, donde son los alumnos mismos quienes construyen las nuevas ideas revisando los modelos clásicos y sus preconcepciones. Hay dos ingredientes determinantes en este proceso: por una parte, la *personificación* permite a los alumnos entender y cuestionar de una manera activa las analogías y diferencias existentes entre el modelo antiguo y el nuevo; por otra, el *contexto* (histórico, en este caso) aparece como un factor necesario para la construcción del modelo actualizado.

Hay dos ingredientes determinantes: la *personificación* (que permite a los alumnos enten-

Hay dos ingredientes determinantes: la *personificación* (que permite a los alumnos entender y cuestionar de una manera activa las analogías y diferencias entre el modelo antiguo y el nuevo) y el *contexto* (que aparece como un factor necesario para la construcción del modelo actualizado)

der y cuestionar de una manera activa las analogías y diferencias entre el modelo antiguo y el nuevo) y el *contexto* (que aparece como un factor necesario para la construcción del modelo actualizado).

### Nota

1. De esta actividad salen otros debates (Tuzón, 2014) que están fuera del ámbito de este artículo.

### Referencias bibliográficas

- ACHER, A.; ARCÀ, M.; SANMARTÍ, N. (2007): «Modeling as a teaching learning process for understanding materials: A case study in primary education». *Science Education*, núm. 91, pp. 398-418.
- CERN/ATLAS (2010): CERN: *The Standard Model of Particle Physics* [en línea]. <[www.youtube.com/watch?v=V0KjXsGRvoA](http://www.youtube.com/watch?v=V0KjXsGRvoA)>. [Consulta: junio 2014]
- LINDGREN, M.C.J.R., y otros (2012): «Serious Games in Embodied Mixed Reality Learning Environments». *Proceedings for the Games Learning and Society Conference*, núm. 8. También disponible en línea en: <[http://egl.lsi.asu.edu/publications/GLS\\_2012\\_Proceedings\\_Johnson\\_Glenberg\\_et\\_al.pdf](http://egl.lsi.asu.edu/publications/GLS_2012_Proceedings_Johnson_Glenberg_et_al.pdf)>. [Consulta: junio 2014]
- SINARCAS, V.; SOLBES, J. (2013): «Dificultades en el aprendizaje y la enseñanza de la física cuántica en el bachillerato». *Enseñanza de las Ciencias*, núm. 31, pp. 9-25.
- SOLBES, J. (2009): «Dificultades de aprendizaje y cambio conceptual, procedimental y axiológi-

- co (I): Resumen del camino avanzado». *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, núm. 6, pp. 2-20. También disponible en línea en: <[http://venus.uca.es/eureka/revista/Volumen6/Numero\\_6\\_1/Solbes\\_2009a.pdf](http://venus.uca.es/eureka/revista/Volumen6/Numero_6_1/Solbes_2009a.pdf)>. [Consulta: junio 2014]
- (2013): «¿Física contemporánea o física para la ciudadanía?». *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, núm. 75, pp. 9-17.
- SOLBES, J.; SILVESTRE, V.; FURIÓ, C. (2010): «El desarrollo histórico de los modelos de átomo y enlace químico y sus implicaciones didácticas». *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, núm. 24, pp. 83-105. También disponible en línea en: <<http://ojs.uv.es/index.php/dces/article/view/2402/1947>>. [Consulta: junio 2014]
- TUZÓN, P. (2014): *Diagnóstico del proceso de enseñanza-aprendizaje de la física de partícula en bachillerato*. Trabajo de final de máster inédito. Universidad de Valencia.
- VAN DRIEL, J.H.; VERLOOP, N. (2002): «Experienced teachers' knowledge of teaching and learning of models and modelling in science education». *International Journal of Science Education*, núm. 24, pp. 1255-1272.

## Dirección de contacto

### Jordi Solbes

Universidad de Valencia

[jordi.solbes@uv.es](mailto:jordi.solbes@uv.es)

### Paula Tuzón

Universidad de Valencia

[paula.tuzon@uv.es](mailto:paula.tuzon@uv.es)

Este artículo fue solicitado por ALAMBIQUE. DIDÁCTICA DE LAS CIENCIAS EXPERIMENTALES en febrero de 2014 y aceptado en junio de 2014 para su publicación.