

Aprendizaje de la física mediante la expansión del metacontexto de los fenómenos

Naoki Ueno y Norifumi Arimoto



R

Desde una perspectiva socio-cultural los autores ven las "concepciones ingenuas" en física no como simples entidades o representaciones mentales, sino como construcciones de un sistema interactivo entre el mundo real y los dispositivos cognitivo-culturales de una determinada cultura. En esta perspectiva el cambio conceptual desde una concepción "ingenua" a una científica sería sólo y más bien un cambio de meta-contexto cultural e implica más un proceso de recontextualización que la simple transición de una estructura conceptual a otra.

INTRODUCCION

La última década ha producido cuantiosas investigaciones sobre la física 'natural' del individuo -en el sentido de no aprendida- tanto en la ciencia cognoscitiva como en la enseñanza de la física. Aunque muchos investigadores están de acuerdo en la existencia y la robustez de esta física natural, se ha debatido mucho sobre su naturaleza.

Sin embargo, casi todas las formulaciones previas de la naturaleza de la física natural se centran únicamente en las representaciones mentales de los estudiantes no formados. Además, el "cambio conceptual" se concibe como un suceso que solo se da en la mente. En la medida en



que nos centremos exclusivamente en el conocimiento representativo mental, es difícil describir adecuadamente de dónde procede la física natural y cómo podría darse el cambio conceptual.

En nuestra opinión, es más adecuado considerar la física natural como un sistema interactivo entre agentes cognoscitivos, objetos reales y el entorno físico que como teorías sistemáticas o conocimientos de la mente. Por ejemplo, como ya discutimos anteriormente (Ueno, Arimoto y Yoshioka, 1991), el hecho de que residamos en un campo gravitatorio es particularmente crítico para especificar de dónde procede la física natural. Además, el hecho de que la base sobre la que nos sostenemos sea 'estática' contribuye críticamente a nuestra conceptualización de la física natural. En otras palabras, nos sería imposible 'inventar' la misma física natural en un entorno sin gravedad y sin una base 'estática'.

Más aún, la construcción de teorías o similares siempre está asociada a un tipo específico de marco lingüístico. No podemos hablar sobre nuestra propia teoría sin hacer referencia a un marco lingüístico del que participamos. En otras palabras, la 'teoría' siempre tiene unas raíces sociales. Por ejemplo, podemos considerar que la teoría medieval del ímpetu estaba asociada a un marco lingüístico específico de la filosofía natural. Por otra parte, en el discurso cotidiano no necesitamos definir deliberadamente los conceptos de fuerza y movimiento. Un marco lingüístico específico requiere que articulemos el concepto de fuerza y movimiento. En este sentido, las 'preconcepciones' pueden considerarse más una invención social que una invención de la mente individual.

Esto se aplica al caso del aprendizaje. El aprendizaje no es solo un suceso que se da en la mente: también se puede caracterizar como el cambio de un sistema interactivo compuesto de personas que conocen y unas situaciones específicas. De ser así, la robustez de la física natural no solo procede de la naturaleza de las mentes individuales sino también de la naturaleza de un sistema de aprendizaje que incluye instrumentos de mediación y organización social. Por ejemplo, el tipo de metacontexto implícitamente compartido en un marco lingüístico lleva a los participantes a una manera específica de pensar. Si distintos tipos de marcos lingüísticos no comparten un metacontexto, la falta de comunicación entre estos marcos continúa. Nos parece que, con frecuencia, se produce exactamente la misma situación en las aulas de física. Por tanto, un diseño de instrucción debería reorganizar la mala comunicación existente entre distintos tipos de marco lingüístico. Expandir el metacontexto del fenómeno es necesario para estudiantes, enseñantes y diseñadores de instrucción, desde la vertiente de los participantes en esta reorganización.

En este artículo describimos el proceso implicado en el aprendizaje de la física newtoniana ampliando un metacontexto de fenómenos junto con una propuesta de diseño para la enseñanza de la mecánica. Antes de discutir el aprendizaje, observaremos la diferencia entre el metacontexto de un discurso cotidiano y el metacontexto de un discurso newtoniano. La razón de ello es que no ha habido una investigación suficiente sobre esta diferencia crítica entre el metacontexto del discurso



cotidiano y el metacontexto del discurso newtoniano aunque sí se han llevado a cabo muchas investigaciones sobre la naturaleza de la explicación en la física natural.

EL METACONTEXTO DE LOS DISCURSOS COTIDIANO Y NEWTONIANO

Creemos que en el discurso cotidiano existe un metacontexto que es drásticamente distinto del de la física newtoniana. Este metacontexto parece ser tácito y se puede observar comparándolo con el del discurso newtoniano en vez de observándolo meramente lo que dicen explícitamente las personas. Presentaremos algunos ejemplos. El primer ejemplo se refiere a una manera de hablar sobre la velocidad de un objeto.

(a) La velocidad de este automóvil es de 50 millas por hora.

(b) ¿Cuál es nuestro marco de referencia para expresar la velocidad de ese automóvil? ¿Es la tierra, el sistema solar o el sistema galáctico?

En el ejemplo anterior, (a) muestra el discurso ordinario cotidiano y (b) muestra el discurso newtoniano. En el discurso cotidiano, no se hace referencia explícita al marco de referencia para la observación. Nunca preguntamos dónde se encuentra el punto de vista desde el que hacemos la observación cuando hablamos de la velocidad de un objeto. En cambio, tácitamente se considera el 'suelo estático' como marco de referencia natural. En consecuencia, una pregunta como la expresión (b) se consideraría muy excéntrica en el discurso cotidiano. Si planteamos una pregunta como (b), la conversación será un tipo de 'experimento de ruptura' como el usado por los etnometodólogos. Los 'terrenos rutinarios' (Garfinkel, 1964) o el 'metacontexto' (Bateson, 1979) que se comparten socialmente en la conversación quedará destruido por una pregunta como esta. Por otra parte, en el discurso newtoniano, identificar un marco de referencia para la observación es extremadamente importante.

El segundo ejemplo se refiere a la fuerza (Ueno, Arimoto y Fujita, 1990).

(1) Susie abofetea la cara de Tom.

(2) La cara de Tom es abofeteada por Susie.

En la frase (1), Susie es el agente y el personaje principal y Tom es el paciente. En cambio, en la frase (2), Tom es el paciente y el personaje principal. Sin embargo, Susie sigue siendo el agente. Utilizamos las frases (1) o (2) según el tema o enfoque que se adopte en cada momento. Estas dos frases son 'repartos' (en tanto que papeles o roles) naturales.

Consideremos ahora cómo se abordarían estos dos ejemplos desde la perspectiva de la física newtoniana. Podrían expresarse como sigue:

(1) Susie abofetea la cara de Tom.

(3) La cara de Tom abofetea la palma de la mano de Susie.

(4) La fuerza de la bofetada de Susie es igual que la fuerza de la bofetada de Tom.

Evidentemente, las frases (3) y (4) carecen de sentido pragmático en el empleo natural de la lengua. Como se muestra más arriba, en el



empleo natural del lenguaje, el agente y el paciente suelen ser fijos. Aunque una frase se transforme de activa a pasiva, la relación entre el agente y el paciente es invariable.

De nuevo el metacontexto del discurso cotidiano parece diferir del metacontexto del discurso newtoniano. La 'fijación del reparto' del discurso cotidiano parece depender del mismo metacontexto que el ejemplo anterior relativo a la velocidad. La razón de ello es que el papel de un objeto en movimiento como agente solo es posible si el punto de vista estático se presupone tácitamente.

Por otra parte, en la física newtoniana no podemos fijar el reparto de papeles porque no se presupone la existencia de un punto de vista estático para la observación. Un objeto en movimiento no se mueve necesariamente. De la misma manera, un objeto estático no es necesariamente estático. La velocidad de un objeto depende del sistema inercial en relación a la posición del observador. Por tanto, la colisión entre un objeto en movimiento y un objeto estático se puede considerar simplemente como la interacción entre dos objetos.

Sin embargo, en el discurso cotidiano, compartimos la sensación de que la descripción de la frase (3) simplemente carece de sentido. Por tanto, el segundo ejemplo también muestra que el 'terreno rutinario' o el 'metacontexto' es compartido socialmente en el discurso cotidiano. Como se muestra en los ejemplos anteriores, en el discurso cotidiano el 'hecho' de que el suelo sea estático no solo se presupone tácitamente sino que también se comparte socialmente, aunque las personas de nuestras comunidades saben que la tierra tiene movimientos de rotación y traslación.

Mach (1883) indicó que la fórmula ' $f=ma$ ' de la Segunda Ley de la física de Newton no es más que repetir de otra manera la Tercera Ley del movimiento ya que esta Tercera Ley también puede describirse como ' $ma'=ma$ '. La fórmula ' $ma'=ma$ ' significa que dos objetos de masa m y m' que interactúan entre sí son agentes y pacientes al mismo tiempo.

El metacontexto del discurso cotidiano es similar al de Aristóteles y al de la teoría medieval del ímpetu pero es completamente diferente del de la física newtoniana. Sin embargo, esto no significa que un marco lingüístico del discurso cotidiano sea igual que el de las filosofías naturales medievales. En el siguiente apartado, compararemos un marco lingüístico de discurso cotidiano con el de las filosofías naturales.

ACCIONES SITUADAS Y TEORIA

En la vida de cada día, raramente definimos los términos movimiento y fuerza a propósito. Tampoco explicamos deliberadamente qué tipo de fuerza actúa sobre un objeto. Por ejemplo, cuando lanzamos una moneda al aire, simplemente prestamos atención a la trayectoria de la moneda para comprobar si está controlada según nuestra predicción. Esto es porque sabemos que una moneda lanzada al aire caerá.

Naturalmente, la información perceptiva de pautas de movimiento de objetos es un recurso muy crítico necesario para controlar objetos y



nuestras propias acciones situadas (Gibson, 1979; Suchman, 1987). Como mostramos en el experimento sobre percepción del movimiento (Uemo, Arimoto y Yoshioka, 1991) y, más concretamente, sobre el movimiento en dirección vertical, el movimiento de caída libre debido a la gravedad era percibido como 'soltar', es decir, como un suceso natural no causal. En cambio, los movimientos contra la gravedad que representan una caída desacelerada y una caída a una velocidad constante eran percibidos como 'causados', es decir, como movimientos que implican un agente y un paciente. En lo que se refiere al movimiento en dirección horizontal, los movimientos contra el estado estacionario del suelo como, por ejemplo, un movimiento a velocidad constante y un movimiento acelerado, también eran percibidos como 'causados', es decir, como movimientos que implican un agente y un paciente. En resumen, los movimientos que se desviaban de la caída libre y del estado estacionario eran percibidos como 'causados'. De acuerdo con información relativa a estas pautas de movimiento, podemos controlar fácilmente objetos y nuestras propias acciones.

En la vida de cada día, también solemos comunicarnos con frecuencia haciendo mención a movimientos y fuerzas. Sin embargo, parece que en casi todos los casos no nos comunicamos para explicar fenómenos sino para coordinar nuestras acciones situadas. Por ejemplo, solemos decir 'empuja más' o 'sigue tirando'. Con todo, raramente articulamos el significado de la fuerza y el movimiento en el discurso cotidiano.

Como se indicó en el apartado anterior, el metacontexto del discurso cotidiano es similar al de la teoría del ímpetu. Sin embargo, las acciones situadas y la comunicación para coordinar estas acciones no son la teoría del ímpetu. La razón de ello es que la función descriptiva y explicativa del movimiento y la fuerza en el discurso cotidiano es claramente distinta de la de las filosofías naturales medievales. En otras palabras, lo que uno describe como movimiento y fuerza es distinto en el discurso de la filosofía natural y en el discurso cotidiano. Como resultado, lo que se describe en relación al movimiento y a la fuerza es distinto. También es diferente la manera de explicar los fenómenos.

La 'teoría' no existe en una mente individual que reside en el vacío. En cambio, está incorporada a un marco lingüístico específico de una comunidad concreta. No podemos discutir si una descripción y una explicación sobre el movimiento y la fuerza son conocimientos de tipo teórico sin hacer referencia al tipo de marco lingüístico del que participamos.

De ser así, debemos observar el tipo de marco lingüístico en cuyo seno se inventa la 'teoría'. Creemos que la lección de Nakamura (Nakamura, 1974) relativa al concepto de la fuerza es especialmente pertinente a nuestra discusión. Nakamura dio una serie de problemas (como el que se muestra en la figura 1) a estudiantes universitarios en una clase de física. Tras la discusión, muchos estudiantes seguían creyendo que la 'fuerza' que movía el tren era mayor que la fuerza de la fricción de los raíles y de la fricción del aire cuando el tren se movía. Afirmaban además que el tren se detendría cuando la fuerza que lo movía fuera mayor que la fuerza de la fricción de los raíles y de la fricción



FIGURA 1:
El problema de Nakamura

Elegir entre las siguientes alternativas (a,b,c) para rellenar los cuadros:

1. Cuando la velocidad del tren aumenta
2. Cuando la velocidad del tren disminuye
3. Cuando la velocidad del tren es constante

a) la fuerza propulsora es mayor que la fricción
b) la fuerza propulsora es igual que la fricción
c) la fuerza propulsora es menor que la fricción.



del aire cuando el tren se movía [sic]. Afirmaban que el tren se detendría cuando la fuerza que lo movía fuera igual que la fuerza de la fricción de los railes y de la fricción del aire. A medida que avanzaba la discusión, sus argumentos iban siendo más elaborados y coherentes con su marco de referencia teórico que antes. Por ejemplo, creían que había una fuerza 'extra' incluso después de que el motor del tren se hubiera parado. Después, esta fuerza 'extra' disminuía debido a la fricción. El concepto de 'fuerza extra' al que se referían los estudiantes es muy similar al concepto medieval del ímpetu.

Observemos que las explicaciones elaboradas y coherentes de los estudiantes fueron el resultado de la participación en un marco lingüístico específico en el que se trata de interpretar la fuerza que actúa sobre un tren. En esta situación, se formó socialmente algo parecido a la 'teoría del ímpetu' en la discusión con el enseñante. La lección de Nakamura se puede considerar una simulación del marco lingüístico de la filosofía natural medieval aunque no era esa la intención del enseñante.

Esto también se aplica al caso del problema de la fuerza que actúa en una moneda lanzada al aire. Como se ha indicado anteriormente, en el discurso cotidiano no explicamos deliberadamente la fuerza que actúa en una moneda lanzada al aire. Las situaciones en las que debemos explicar la fuerza que actúa sobre un objeto para explicar un fenómeno son muy específicas.

También debemos destacar que el metacontexto del problema del tren de Nakamura y del problema de la moneda parece limitarse al movimiento sobre el suelo. En otras palabras, parece que se presupone tácitamente un punto de vista estático en el suelo. En este sentido, los dos problemas parecen compartir el mismo metacontexto que la teoría de Aristóteles y la teoría del ímpetu siempre y cuando un enseñante o un experimentador no traten de explicar el metacontexto de la física newtoniana.

Por otra parte, en el marco lingüístico newtoniano, debemos clarificar cuál es nuestro marco de referencia cuando tratamos de describir el



movimiento y la fuerza. En la física newtoniana, el marco de referencia suele ser normalmente el de un sistema inercial. Sin embargo, en algunos casos un marco de referencia se puede situar en un sistema acelerado. Si nuestro marco de referencia se encuentra en un sistema acelerado, la definición de la fuerza es distinta de la definición de la fuerza en un sistema inercial. Por tanto, hablando estrictamente, en la física newtoniana un problema debe incluir información relativa al tipo de sistema.

Así pues, podemos considerar que la física natural o las preconcepciones son algo generado por la participación en un marco lingüístico específico de una comunidad específica. Este marco lingüístico tiene el mismo metacontexto que el discurso cotidiano. Sin embargo, un sistema de investigación es diferente de un sistema de comunicación cotidiano.

EL APRENDIZAJE COMO RECONTEXTUALIZACIÓN EXPANSIVA

Nos parece que, al aprender física newtoniana, los aprendizajes de tipo falsificación o equilibración no pueden producir cambios conceptuales. Esto es porque los estudiantes no pueden conocer el metacontexto de la física newtoniana mediante la falsificación de sus predicciones. Por ejemplo, aun después de que los estudiantes puedan predecir correctamente el resultado de un experimento de caída libre como, por ejemplo, la caída simultánea de objetos de distinta masa, no se produce un cambio conceptual. Los estudiantes tienden a considerar los fenómenos de caída libre solo como un caso específico aun después de observar el experimento. En realidad, simplemente consideran que el fenómeno de la caída libre no tiene nada que ver con el 'peso'.

Esto se aplica al caso del concepto de inercia. Aun después de que los estudiantes observen un experimento sobre la relatividad del movimiento, nunca modifican su noción del movimiento y de la fuerza (Ueno, Arimoto y Fujita, 1990). Por ejemplo, como se muestra en las figuras 2a y 2b, muchos estudiantes recién llegados a la universidad respondieron que el movimiento observado desde el suelo es el movimiento real y, por otra parte, respondían que el movimiento observado desde otro sistema como la nave de velocidad constante solo es una apariencia. Este resultado indica que el suelo se considera implícitamente como el marco de referencia propio de este discurso. Además, también presuponen implícitamente que el suelo es estático. La razón de ello es que el movimiento observado desde el suelo se considera la 'realidad' y el movimiento observado desde la nave se considera una mera 'apariencia'. En general, el vector de fuerza descrito por los sujetos variaba según el punto de vista de la observación. Por ejemplo, como se muestra en la figura 2b, en el caso de la bola de acero que cae desde la punta de un mástil de la nave, las fuerzas descritas como actuantes sobre la bola de acero eran la gravedad y 'la fuerza hacia adelante' cuando el punto de vista se encontraba en el suelo. En cambio, la gravedad era la única fuerza descrita cuando el punto de vista se encontraba en la nave. Sin embargo, si se preguntaba a los sujetos qué vector de fuerza descrito en los dos casos era la fuerza real o si las dos eran fuerzas reales, casi todos respondieron que las fuerzas descritas en el movimiento observado desde el suelo eran las fuerzas reales. Este resultado es cohe-



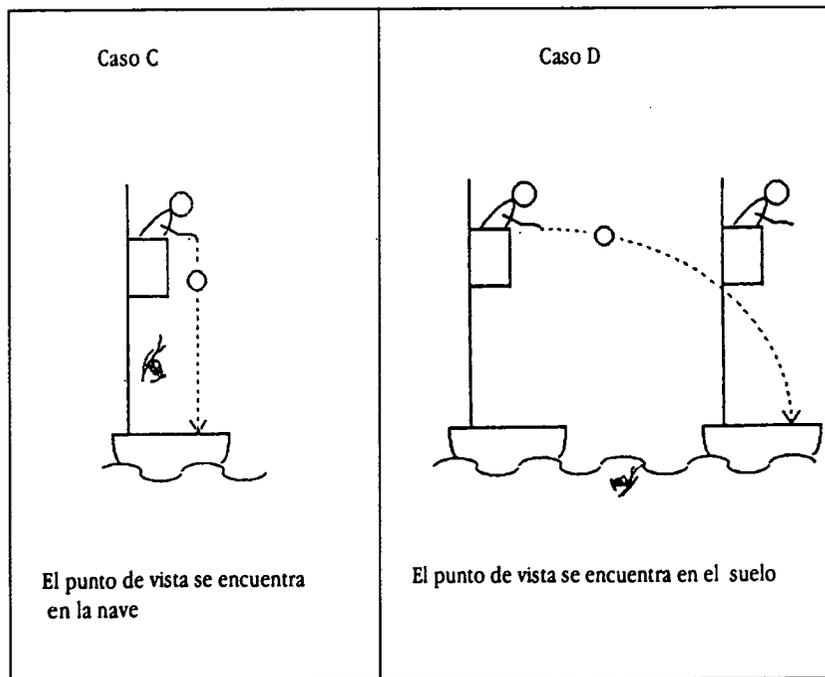
rente con la 'distinción entre realidad y apariencia' entre los movimientos observados desde el suelo y desde la nave.

Por tanto, enseñar sin clarificar el metacontexto de la física newtoniana no produce cambios conceptuales. La interpretación de los estudiantes sigue siendo muy local incluso después de ser capaces de predecir correctamente fenómenos de movimiento y fuerza. En otras palabras, los resultados de los experimentos se interpretan dentro del metacontexto tácito. Para producir un cambio conceptual, los estudiantes deben recontextualizar los fenómenos bajo el otro metacontexto. En otras palabras, aprender física newtoniana requiere, sin ningún género de duda, una recontextualización expansiva.

El proceso de aprender física newtoniana es aparentemente distinto de resolver problemas dentro de un contexto dado. Más bien debemos expandir el contexto del problema para concentrar la atención de un estudiante en su propio metacontexto. Esta perspectiva está relacionada con el punto de vista de Engeström de 'aprendizaje por expansión' (Engeström, 1987). Según Engeström, aprender no se debe considerar únicamente como la adquisición de nuevas capacidades y la resolución de problemas dentro de un contexto dado, sino también como la expansión de este contexto dado.

Por tanto, diseñar la enseñanza de la mecánica debería apoyar la recontextualización expansiva de los estudiantes. Concretamente, al

FIGURA 2
Los problemas de la relatividad del movimiento





principio, la astronomía producirá un contexto adecuado para recontextualizar fenómenos de movimiento y fuerza en el suelo. Por ejemplo, el experimento de la relatividad del movimiento debería mostrarse en el contexto de la disputa entre el heliocentrismo y el geocentrismo tal como la mostró Galileo. En segundo lugar, se debería mostrar el mismo fenómeno bajo el contexto del debate relativo a los modelos espaciales. Por último, el concepto de fuerza y movimiento debería ser reinterpretado bajo este metacontexto. Desarrollamos un diseño de instrucción siguiendo estas directrices (Ueno, Arimoto y Fujita, 1990). Examinaremos a continuación los detalles de este diseño.

DISEÑAR LA CONVERSACION

Para elaborar la sesión de aprendizaje sobre dinámica, potenciamos la naturaleza social del conocimiento científico. Como se ha mencionado anteriormente, ninguna teoría científica de la historia se ha producido dentro de una mente individual sin interacción social. Siempre ha existido una comunidad científica determinada y algunos instrumentos con los que interactuar cuando una teoría ha sido inventada y compartida. Solo en la retórica de la historia de nuestra ciencia los científicos inventan teorías por su cuenta, en el vacío social. En este sentido, preparamos cuidadosamente el metacontexto distinto del cotidiano en el que una fuerza dada y, por tanto, invisible, como la gravedad, resulta ser el tema de la charla. En vez de los tipos tradicionales de enseñanza de la física, nosotros rediseñamos intencionalmente la conversación de la física newtoniana. En este estado social de aprendizaje, al que denominamos 'escenario', los sujetos se veían obligados a redefinir su concepto de movimiento de una manera totalmente distinta a los conceptos cotidianos. Les dimos la oportunidad de observar varios movimientos desde un punto de vista newtoniano, es decir, no desde un punto de vista localizado en un suelo estático sino desde un punto de vista situado en el espacio. Este metacontexto socialmente compartido es precisamente el aspecto que deseamos destacar y no se hace referencia a él en anteriores estudios dedicados al diseño de enseñanza de la física (Pea, 1991).

El diseño de esta conversación implicaba dos elementos. El primero estaba formado por grupos de preguntas sobre la relatividad del movimiento y la fuerza. El segundo constaba de varios experimentos con un vídeo y con un ordenador personal. Utilizamos estas preguntas y experimentos como dispositivos para construir un escenario, la base conversacional para la teoría de Newton. No hacíamos estas preguntas para infundir conocimientos en el sentido ordinario de la situación educativa tradicional sino para reconstruir la presuposición tácita de la conversación. Para dar una respuesta a cada una de estas preguntas, los sujetos tenían que redefinir su concepto de movimiento. Se les pedía que clarificaran si existía o no un punto de observación fijo y si el movimiento implicaba o no una fuerza en esta conversación newtoniana simulada.

Los experimentos con el vídeo y las simulaciones por ordenador de diversos movimientos también funcionan para organizar el marco social



de la conversación. Como se observa en cualquier práctica en clase o en estudios anteriores, los experimentos y las simulaciones por sí solas no bastan para producir cambios conceptuales. Si no hay una base de conversación para la materia que se estudia, cualquier buen experimento o simulación no será más que un truco extraño o, como mucho, una manera de hacer que la gente crea en una noción científica. Recalcamos la naturaleza social de los experimentos o las simulaciones científicas que, en un sentido ordinario, se considera son la manera de revelar el dato o la naturaleza oculta de un objeto para asegurar la teoría. Aunque una parte de esta creencia es cierta, lo más importante es ver una ciencia como una actividad social dentro de una comunidad determinada. En el sentido social, un experimento o una simulación son dispositivos para mantener la base de conversación de la comunidad. Son medios para representar un objeto que encajan en la actividad de la comunidad científica. La visibilidad, la precisión y la reproducibilidad del experimento científico deben hacer que la comunidad comparta el dato científico y permitir que los científicos 'unan cosas' (Latour, 1990). El experimento y la simulación son representaciones socialmente compartidas en esta comunidad y son maneras de mostrar socialmente el metacontexto de una actividad.

Se da por supuesto que existe un cierto punto de vista tras cualquier representación visual como fotografías o dibujos. Más allá de ellas presentimos la existencia de la intención y el propósito del autor, de una idea. Ninguna de ellas es una simple representación óptica del objeto real sino que existe una actividad de fondo. No solo existe en las fotografías de una guerra, sino también en la fotografía del menú de un restaurante o de un documento de identidad. Cuando vemos y utilizamos estas representaciones, compartimos con el realizador de las imágenes y su comunidad la relación con el objeto representado.

Sin embargo, esta 'personalidad de la representación' se explica raras veces, especialmente en representaciones científicas como imágenes de un libro de texto de ciencias o en los gráficos generados por ordenador que suelen salir por TV. Nosotros recalcaremos que sigue existiendo un realizador de la representación y su comunidad tras cualquier representación científica. Estas representaciones muestran ciertas relaciones entre la comunidad científica y el objeto, no una verdad de la naturaleza.

En este sentido diseñamos y utilizamos la simulación por ordenador de varios movimientos. Para elaborar esta simulación se utilizó 3D POINT OF VIEW LOGO, una versión del lenguaje LOGO que permite situar y mover libremente el punto de vista de la tortuga dentro de un espacio tridimensional. Con esta simulación por ordenador con múltiples puntos de vista los sujetos observaban varios movimientos como bombardeos desde un avión, jugar a la pelota, un globo flotando, etc., desde diferentes puntos de vista. Estos puntos de vista no solo diferían en cuanto a su representación gráfica en la pantalla. Los puntos de vista que implementamos en estas simulaciones son las representaciones



socialmente compartidas del movimiento de la física newtoniana y de la física cotidiana. Por ejemplo, el punto de vista que se mueve horizontalmente con el objeto nos da una representación de la física newtoniana porque en esta composición visual solo se puede observar un movimiento vertical provocado por la gravedad.

INTRODUCCION DE LA RELATIVIDAD DEL MOVIMIENTO EN CONTEXTO DE LA ASTRONOMIA

En la primera sesión, denominada Instrucción A, se introdujo la relatividad del movimiento en un contexto en el que se puede reconocer el movimiento de la tierra. En las secciones 8, 9 y 10 se muestran ejemplos de las preguntas incluidas en la instrucción. Como se muestra en las figuras 3.1 y 3.2, un objeto soltado desde un avión es observado desde dos puntos de vista; es decir, desde el suelo y desde un punto de vista desde el que se puede observar que la tierra se mueve.

En esta situación, por ejemplo, la caída libre de un objeto soltado

FIGURA 3.1.

Una bola soltada desde un avión quieto en el aire (visto desde el suelo)

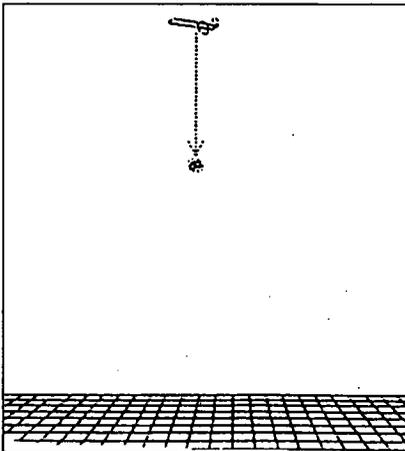
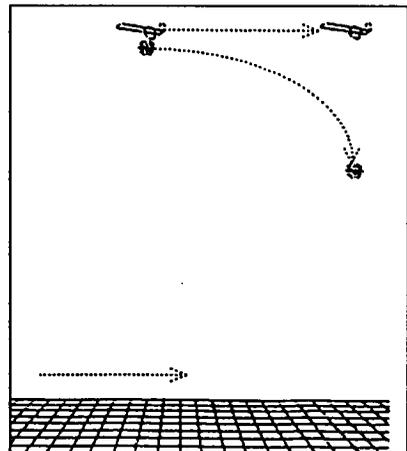


FIGURA 3.2.

Una bola soltada desde un avión quieto en el aire (visto desde un satélite)



desde un avión quieto en el aire tal como lo ve un observador situado en el suelo es percibida como un movimiento parabólico por alguien que pueda observar la tierra moviéndose a una velocidad constante dentro de un cierto rango horizontal. Por otra parte, el movimiento de un objeto soltado desde un avión que vuela a velocidad constante en relación al suelo también es percibido simplemente como una caída libre desde un punto de vista donde el avión permanece estático y la tierra se mueve a una velocidad constante. En la figura 4.1 se muestra una predicción alternativa, es decir, una versión incorrecta, del objeto soltado desde el avión. En esta alternativa, el objeto soltado desde el avión con una velocidad constante cae directamente hacia abajo inmediatamente después de haber sido soltado. Sin embargo, en



esta versión incorrecta, cuando el objeto se observa desde el punto de vista donde el avión parece estático, cae siguiendo una dirección hacia atrás como se muestra en la figura 4.2.

En la Instrucción A, las situaciones descritas anteriormente fueron presentadas mediante gráficos por ordenador desarrollados con 3D POINT OF VIEW LOGO. Los estudiantes podían buscar diversas visiones modificando el punto de vista.

Los problemas de la relatividad del movimiento se presentaron exactamente en el mismo contexto que Galileo. Se trata de un nuevo contexto para el problema con el fin de que los estudiantes reconsideren la fuerza y los movimientos en el suelo. No podemos esperar que los estudiantes modifiquen su conceptualización sobre la fuerza y el movimiento inmediatamente después de la presentación de este contexto. Sin embargo, al menos podemos esperar que este nuevo contexto amplíe el contexto de problema del movimiento y la fuerza. Este contexto de problema se amplió aún más en la segunda sesión de instrucción.

PROBLEMAS RELATIVOS A MODELOS DE ESPACIO

Mostraremos el ejemplo de diseño de instrucción que en la segunda sesión se denominaba Instrucción B. Los problemas que siguen se refieren a sistemas estacionarios y a sistemas de movimiento lineal uniforme. (Los asteriscos indican la respuesta correcta desde la perspectiva de la física newtoniana). En los problemas primero y segundo se preguntaba si podemos distinguir un sistema estacionario de un sistema de movimiento lineal uniforme.

(1) Imagina que vas en un automóvil que corre por el suelo con un movimiento lineal uniforme. Si no puedes ver el exterior del coche, ¿puedes determinar si te mueves o no?

*No.

(2) Dos automóviles se cruzan en el suelo. Uno es estático y el otro se mueve con una velocidad lineal constante. Si los pasajeros no pueden ver nada salvo el otro coche a través de las ventanas, ¿pueden ver qué coche es

FIGURA 4.1.

*Una bola soltada desde un avión en vuelo
(visto desde el suelo)*

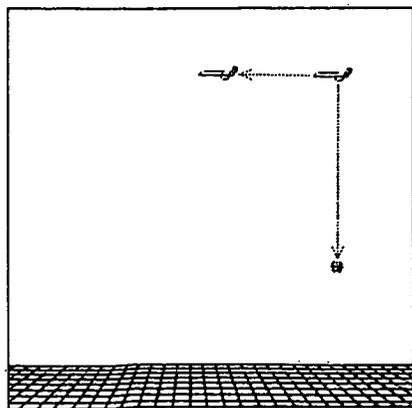
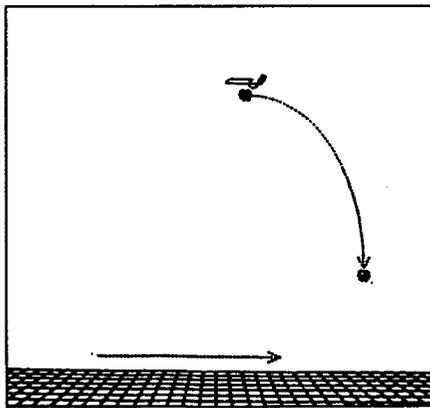


FIGURA 3.1.

*Una bola soltada desde un avión en vuelo
(visto desde un satélite)*





el que se mueve y cuál es el estático?

*No.

(3) El problema es similar al anterior N° 2 salvo porque los automóviles son sustituidos por lanzaderas espaciales. Se pregunta si desde una tercera lanzadera espacial se puede decidir cuál de las otras dos lanzaderas es la que se mueve.

*No.

(4) ¿Podemos encontrar un punto de vista desde el que poder distinguir un movimiento de velocidad constante de un estado estacionario?

*No.

Algunos estudiantes dijeron que no existe ningún punto de vista desde el que se pueda distinguir entre un movimiento de velocidad constante y un estado estacionario. Algunos dijeron que debe existir un punto de vista estático absoluto en algún lugar del espacio. En los problemas (3) y (4) los fenómenos fueron recontextualizados. En otras palabras, estas preguntas pedían un modelo de espacio. Observemos algunos protocolos relativos al problema (4).

T1: ¿Este problema es en la tierra?

E: No. Este problema es en cualquier lugar del espacio.

T2: Si este problema es en la tierra, si uno considera la tierra como un estado estacionario, existe un punto de vista (desde el que uno puede distinguir un estado estacionario de un movimiento lineal uniforme).

E: La tierra tiene movimientos de rotación y traslación.

T1: Si pensamos así, no existe ningún punto de vista (desde el que uno puede distinguir un estado estacionario de un movimiento lineal uniforme).

T2: Yo voto por la opinión de que no existe ningún punto de vista (desde el que uno pueda distinguir un estado estacionario de un movimiento lineal uniforme).

En este protocolo, T1 preguntó directamente por el contexto del problema. Respondió que no existe ningún punto de vista desde el que distinguir un estado estacionario de un movimiento lineal uniforme si no se considera que la tierra es estática.

En realidad, los estudiantes ya habían conocido los resultados de algunos de estos experimentos puesto que, en la sesión anterior denominada Instrucción A, los estudiantes habían observado los mismos experimentos en el contexto de la disputa entre heliocentrismo y geocentrismo. En este caso, se mostraron los mismos experimentos en el contexto de la investigación sobre el modelo de espacio. En esta sesión los mismos experimentos sobre la relatividad del movimiento fueron interpretados de manera distinta. Tras observar estos experimentos, algunos estudiantes volvieron a la pregunta del experimentador: '¿Un estado estacionario para qué?'. Luego llegaron a la conclusión de que no podemos juzgar si el objeto que se mueve se mueve realmente porque no podemos juzgar si nuestro punto de vista es realmente estático.



Otro estudiante siguió aferrándose al punto de vista estático para la observación aun después de haber observado los experimentos sobre la relatividad del movimiento, aunque, por otra parte, también comprendía el modelo del espacio relativo. Decía que el punto de vista estático debe encontrarse en algún lugar del universo aunque no se puede descubrir en el espacio que rodea a la tierra. Nos parece que este tipo de explicación también es plausible desde la perspectiva del propio Newton. La razón de ello es que, como se indicó anteriormente, el modelo de Newton del espacio relativo coexistía con el modelo del espacio absoluto.

EL SIGNIFICADO DEL MOVIMIENTO EN EL METACONTEXTO DISTINTO

Además, también planteamos preguntas como las que se muestran a continuación. Los problemas consistían en preguntar sobre 'la apariencia y la realidad' del movimiento observado desde diversos puntos de vista.

(7) Este problema es el mismo que el N° 8 que viene a continuación, salvo por el hecho de que una persona suelta una bola de acero desde la cúspide de una torre y un observador observa la caída de la bola desde una lanzadera que está fuera de la tierra y desde la que la tierra parece estar moviéndose con una velocidad constante.

(8) Imaginemos que un pasajero de un automóvil que corre con una velocidad constante por el suelo suelta una bola de acero. Ve que la bola cae recta hacia abajo. En cambio, un observador que se encuentre en el suelo ve que la bola cae siguiendo una trayectoria parabólica. ¿Qué movimiento es el real?

a. La pauta observada desde el suelo es la real. La pauta observada por el pasajero solo es aparente

b. La pauta observada por el pasajero es la real. La pauta observada desde el suelo solo es aparente.

c. No se puede decir qué pauta de movimiento es real o aparente.

d. Otras explicaciones.

Como se indicó anteriormente, si se plantean independientemente las mismas preguntas sin clarificar un metacontexto, los estudiantes tienden a pensar que los movimientos observados desde el suelo son reales y que los movimientos observados desde la nave solo son aparentes. Por ejemplo, solo el 20-30 por ciento de los estudiantes seleccionaron la opción 'c' en la serie de problemas presentados anteriormente. En cambio, muchos estudiantes seleccionaron una opción como la 'a'. La razón de ello es que los estudiantes consideraban tácitamente estas preguntas como movimientos limitados al suelo.

Sin embargo, esta vez se plantearon las mismas preguntas en un contexto más global. En este experimento de aprendizaje, más del 60-70 por ciento de los estudiantes seleccionaron la opción 'c'; es decir: no se puede



decir qué pauta de movimiento es real o aparente. Antes que nada, en la sesión anterior denominada Instrucción A, se presentaron a los estudiantes los problemas de la relatividad del movimiento en el contexto de los debates suscitados entre el heliocentrismo y el geocentrismo. Por tanto, todos los estudiantes ya sabían que el metacontexto del discurso no se limitaba a los movimientos sobre el suelo. En segundo lugar, al principio de esta sesión denominada Instrucción B, también se preguntó a los estudiantes si se puede encontrar un punto de vista desde el que poder distinguir un movimiento con velocidad constante de un estado estacionario.

En la anterior serie de problemas, el protocolo del estudiante T1 parece ser típico.

T1: Este problema tiene algún error.

E: ¿por qué?

T1: Porque, en la teoría de la mecánica, un punto de vista de observación se sitúa en el suelo estático.

E: La verdad es que no.

T1: ¿Dónde está nuestro punto de vista de la observación? ¿Puedo situarlo en el universo? De ser así, la respuesta es la opción 'c'. No podemos decir qué pauta de movimiento es real o aparente.

T1: ¿Cuál es el significado de 'real'? Si consideramos que la tierra es un estado estacionario la respuesta será distinta de la 'c'. Si consideramos que la tierra se mueve, la respuesta es distinta. ¿Qué perspectiva debería seleccionar?

En este protocolo, el estudiante T1 mostraba claramente que consideraba la mecánica como una teoría basada en un suelo estático. Sin embargo, también dijo que no podemos distinguir entre realidad y apariencia si nuestro punto de vista se encuentra en el universo.

En resumen, se plantearon una serie de preguntas como las mostradas anteriormente en un metacontexto distinto del del discurso cotidiano y de las filosofías naturales medievales. Introducimos un nuevo metacontexto para interpretar los fenómenos. En este contexto, ciertamente, las respuestas de los estudiantes fueron distintas de sus respuestas bajo el metacontexto del discurso cotidiano y de las filosofías naturales medievales.

LA FUERZA Y EL MOVIMIENTO BAJO EL METACONTEXTO GLOBAL

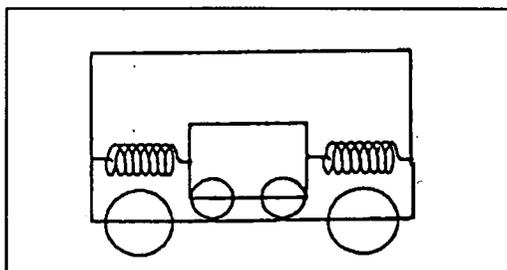
Ahora es el momento de reconceptualizar los conceptos de fuerza y movimiento en base al metacontexto expandido mostrado anteriormente.

En el caso del movimiento acelerado, un objeto recibe una fuerza constante. Además, la fuerza que actúa sobre el objeto no cambia independientemente de los puntos de vista. Un movimiento acelerado se observa como tal desde cualquier sistema inercial.

Por otra parte, un objeto estacionario en el suelo puede considerarse que se mueve a velocidad constante desde otro sistema inercial. Como se muestra en la figura 5, un carro pequeño fijado con muelles al



FIGURA 5
El carro como estado estacionario



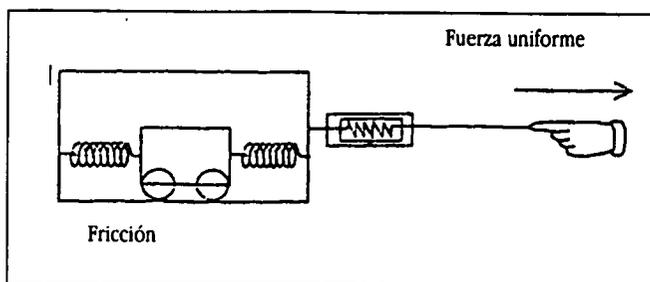
interior de otro carro más grande no se mueve mientras el carro grande esté estático sobre el suelo.

Esto también es cierto en el caso de un objeto moviéndose a velocidad constante sobre el suelo. El objeto puede considerarse estacionario desde otro sistema inercial. Como se muestra en la figura 6, un carro pequeño fijado a un carro grande con muelles no se mueve cuando el carro grande se mueve a una velocidad constante sobre el suelo. Ocurre precisamente lo mismo que antes, cuando el carro pequeño no se movía si el carro grande se mantiene estacionario sobre el suelo. Además, el mismo grado de fuerza que el de la fricción es suficiente para mantener una velocidad constante. En resumen, en el metacontexto expandido, un movimiento lineal uniforme sobre el suelo puede considerarse lo mismo que un estado estacionario en el suelo. Por otra parte, un movimiento lineal uniforme y un estado estacionario contrastan mucho con un movimiento acelerado.

Este era el esquema de reconceptualización de la fuerza y el movimiento que esperábamos en esta subsesión. Mostraremos ahora el detalle de la instrucción. Se planteó el mismo problema sobre el movimiento acelerado y la fuerza pero con dos puntos de vista distintos para la observación. En primer lugar, el punto de vista se situó sobre el suelo. En segundo lugar, el punto de vista se situó en una lanzadera que se 'movía' a velocidad constante.

(1) Supongamos que aplicamos al carro en el suelo una fuerza constante sin fricción, como se muestra en la figura siguiente. ¿Cómo se mueve el carro?

FIGURA 6
El carro tirado por una fuerza uniforme





- a. El carro se mueve con una velocidad constante.
- b. El carro acelera al principio pero pronto se mueve a una velocidad constante.
- *c. El carro sigue acelerando mientras se tira de él.
- d. Otras respuestas.

Experimento: Se aplica a un carro una fuerza constante en unas condiciones en las que existe poca fricción entre el carro y el suelo.

(3) Supongamos que un carro acelera sobre el suelo. ¿Cómo aparece el carro ante un observador situado en una lanzadera espacial que se mueve a una velocidad constante (o que está estática)? El suelo parece moverse a velocidad constante desde la lanzadera.

- a. Parece ser estático.
- b. Parece moverse a velocidad constante.
- *c. Parece acelerar.
- d. Otras respuestas.

En los problemas anteriores se demostró el hecho de que un movimiento acelerado se observa como tal desde cualquier sistema inercial. Al mismo tiempo, se plantea la pregunta de si la fuerza que actúa sobre el carro cambia cuando modificamos el punto de vista de la observación.

Por otra parte, se plantearon los siguientes problemas sobre estados estacionarios y movimientos lineales uniformes.

(1) El problema consiste en preguntar si la fuerza horizontal actúa sobre el carro estático que se encuentra en el suelo o no.

(3) El problema consiste en plantear la misma pregunta que el anterior Nº 1 excepto que el punto de vista de observación se encuentra en una lanzadera espacial en estado estacionario o con un movimiento lineal uniforme.

(5) Como se muestra en la siguiente figura, ¿qué tipo de fuerza horizontal actúa sobre el carro que se mueve a una velocidad constante y sin fricción sobre el suelo?

- a. Una fuerza constante.
- b. Una fuerza cada vez mayor.
- *c. Ninguna fuerza.
- d. Otras respuestas.

(7) Este problema es igual que el anterior Nº 2 salvo que la pregunta es si la fuerza horizontal que actúa sobre el carro cambia según el observador se sitúe en una lanzadera estática o en una lanzadera que se mueve a una velocidad constante.

Experimento: Los sujetos observan que un carro grande (fijado a un carro pequeño con muelles) es tirado por otro muelle. El muelle tira del carro grande a una velocidad constante. Esto también significa que la



fuerza de arrastre es igual que la de fricción. El carro pequeño fijado al carro grande no se mueve mientras el carro grande mantenga una velocidad constante (véase la figura 6).

En el anterior grupo de problemas se mostró que una velocidad constante en el suelo es igual que un estado estacionario desde otro punto de vista. La cuestión es que estos experimentos sobre fuerza y velocidad constante también se mostraron en el metacontexto global. Por ejemplo, se puede considerar que el carro que se mueve a una velocidad constante sobre el suelo está estacionario desde el punto de vista de una lanzadera fuera de la tierra. Por otra parte, el estado estacionario del carro en el suelo se puede considerar como un movimiento a velocidad constante desde el punto de vista de una lanzadera. Bajo este metacontexto, se plantearon las preguntas sobre la fuerza y la velocidad constante.

Como mostraron los resultados de los posttests, la reconceptualización de la fuerza y el movimiento que esperábamos parece alcanzarse (Ueno, Arimoto y Fujita, 1990).

Es extremadamente importante clarificar la diferencia entre el metacontexto del discurso cotidiano y el de la física newtoniana. Aprender física no consiste en abandonar el metacontexto cotidiano sino en clarificar el contraste entre el metacontexto de los dos tipos de discurso. Además, según nuestro punto de vista, debería considerarse que el cambio conceptual comporta procesos implicados en una recontextualización expansiva y no es una mera transición entre una estructura conceptual y otra.

Referencias

- BATESON, G. (1979). *Mind and Nature: A necessary unity*. NY: John Brockman Associates, Inc.
- ENGESTRÖM, Y. (1987). *Learning by expanding: An activity-theoretical approach to developmental research*. Helsinki: Orienta-Konsultit Oy.
- GARFINKEL, H. (1964). Studies of the routine grounds of everyday activities. *Social Problems*, 11, 225-250.
- GIBSON, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton-Mifflin Co.
- LATOUR, B. (1990). Drawing things together. En M. Lynch y S. Woolgar (Eds.), *Representations in scientific practice*. Cambridge: MIT Press.
- MACH, E. (1988). *Die Mechanik in Ihrer Entwicklung. (El desarrollo de la mecánica)*. Mac Rikigaku. Koudan-sha, Tokyo, 1969.
- NAKAMURA, T. (1974). The learning of motion and force. En K. Takahashi y K. Hosoya (Eds.), *Introduction to method of kyokukubi: Modern science education*. Kokudo-sha, Tokyo. (En japonés).
- PEA, R. D. (septiembre 1991). *Augmenting the discourse of learning with computer-based learning environment*. Institute for Research on Learning. Borrador de un capítulo para el libro basado en ARW de la OTAN Computer-Based Learning Environments and Problem-Solving, Leuven, Bélgica.
- SUCHMAN, A. (1987). *Plans and situated actions*. Nueva York: Cambridge University Press.



- UENO, N., ARIMOTO, N. y FUJITA, G. (1990). *Conceptual models and points of view - Learning via making a new stage*. Ponencia presentada ante la Association of Educational Researchers of America (AERA), Boston.
- UENO, N., ARIMOTO, N. y YOSHIOKA, A. (1991). *'Conceptual change' in mass and weight - Gibsonian perspective*. Ponencia presentada ante la Association of Educational Researchers of America (AERA), Chicago.

Aprendizaje de la física mediante la expansión del metacontexto de los fenómenos

Naoki Ueno y Norifumi Arimoto
CL&E, 1993, 19-20, 109-127

Datos sobre el autor: Naoki Ueno trabaja en el National Institute of Educational Research y Norifumi Arimoto en el Tokyo Institute of Technology

Artículo original: Learning Physics by Expanding the Metacontext of Phenomena. En The Quarterly Newsletter of The Laboratory of Comparative Human Cognition, April 1993, Volumen 15, Nº. 2, pp. 53-63. Traducción de Genis Sánchez. Reproducido con autorización de Naoki Ueno y de Norifumi Arimoto y del Laboratory of Comparative Human Cognition.

© De todos los artículos deberá solicitarse por escrito autorización de CL&E y de los autores para el uso en forma de facsímil, fotocopia o cualquier otro medio de reproducción impresa. CL&E se reserva el derecho de interponer acciones legales necesarias en aquellos casos en que se contravenga la ley de derechos de autor.