

COMPRENSIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA TEORÍA ESPECIAL DE LA RELATIVIDAD Y DISEÑO DE UNA VISITA GUIADA A UN MUSEO DE LA CIENCIA

Jenaro Guisasola¹, Jordi Solbes², José Ignacio Barragués³, Antonio Moreno⁴ y Maite Morentin⁵

(1) Departamento de Física Aplicada I. Universidad del País Vasco

(2) IES J. Rodrigo Botet. Manises

(3) Departamento de Matemática Aplicada. Universidad del País Vasco

(4) Departamento de Didáctica de las Ciencias. Universidad Complutense de Madrid

(5) Departamento de Didáctica de las Matemáticas y Ciencias Experimentales. Universidad del País Vasco

[Recibido en Julio de 2006, aceptado en Octubre de 2006]

RESUMEN (Inglés)

El problema que nos planteamos en este trabajo surge de tres diferentes preocupaciones: la importancia del 'aprendizaje no formal' de la ciencia como parte del currículo escolar, la necesidad de alfabetización científica y la importancia de las implicaciones sociales de la ciencia contemporánea. Se ha aprovechado una exposición en el Kutxaespacio de la Ciencia de San Sebastián sobre el centenario de la Teoría Especial de la Relatividad para diseñar una visita de estudiantes de primer curso de Ingeniería y evaluar el aprendizaje logrado. En la primera parte del trabajo se expone el diseño realizado para establecer puentes entre la docencia formal y la visita a la exposición. En la segunda parte se analiza el potencial de la exposición y del diseño realizado para influir en el conocimiento de los estudiantes en tres aspectos de la Teoría Especial de la Relatividad. Los resultados obtenidos muestran que el diseño de visita con actividades previas y posteriores a la misma resulta eficaz para aumentar la comprensión de los estudiantes y estimular su capacidad de argumentar científicamente.

Palabras Clave: *Aprendizaje en contextos no formales; Relatividad Especial; Visitas a Museos.*

INTRODUCCIÓN

En las dos últimas décadas se ha realizado un considerable número de investigaciones sobre el aprendizaje de las ciencias en visitas a museos y centros de ciencia. Como consecuencia hoy día conocemos mucho más sobre los efectos de las visitas y de los módulos de los museos en la educación de los estudiantes (Lucas 1983, McManus

1992, Rennie y McClafferty 1996, Hofstein y Rosenfeld 1996, Pedretti 2002). Muchas de estas investigaciones coinciden en señalar la preocupación por el poco aprendizaje logrado en las visitas escolares, no sólo por la oportunidad perdida en la visita, sino porque en ocasiones aparecen inesperadas concepciones alternativas a las concepciones científicas (Borun, Massey & Lutter 1993, Jeffery-Caly 1998).

En las visitas a centros de ciencia los estudiantes experimentan fenómenos e ideas que son nuevos para ellos. Estas experiencias ocurren en un contexto concreto que suele influir en el modo en el que se construye el conocimiento adquirido. Esto implica, de acuerdo con las teorías constructivistas del aprendizaje (Driver, Newton & Osborne 2000, Gil et al. 2002), que es necesario guiar a los estudiantes en la comprensión de las nuevas experiencias e ideas que experimentan en la visita. Será necesario diseñar un plan de actividades para 'antes, durante y después' de la visita que proporcione a los estudiantes oportunidades para situarse en el contexto de la visita, conocer sus objetivos y discutirlos una vez realizada (Falk y Dierking 1992).

El problema que nos planteamos en este trabajo surge de tres diferentes preocupaciones: la importancia del 'aprendizaje informal' como parte del currículo escolar y universitario; la necesidad de alfabetización científica; y la importancia de los temas de ciencia contemporánea con implicaciones sociales en la vida cotidiana.

El aprendizaje en contextos informales y las 'experiencias fuera del aula' están siendo recomendados como un elemento importante para fomentar el interés y la motivación de los estudiantes hacia las ciencias y su aprendizaje. Las visitas a museos de ciencias representan un tipo de estas actividades y son utilizadas con el propósito de alfabetizar científicamente a estudiantes y adultos. Diferentes investigaciones han mostrado que las visitas a museos y a exposiciones de ciencias, organizadas con actividades a realizar durante las mismas pero planteando también actividades previas y posteriores a discutir en el aula, pueden aumentar considerablemente el interés y el conocimiento de los estudiantes (Anderson, Lucas y Ginns 2000, Henriksen y Jorde 2001, Moreno 2005)

En la última década la frase 'alfabetización científica' se ha convertido en una de las más mencionadas entre los diseñadores del currículo, profesores y responsables de la administración educativa. Esta frase va más allá de un slogan y se relaciona con que los ciudadanos de una sociedad moderna necesitan una mínima comprensión de la ciencia para poder tomar decisiones que les afectan como consumidores y ciudadanos (UNESCO Project 2000+).

La importancia de la ciencia contemporánea en la vida cotidiana y la preocupación por sus consecuencias tecnológicas y sociales ha ido creciendo en las últimas décadas. Son numerosas las revistas, artículos de periódico y eventos que tratan sobre estos temas. En concreto, con motivo del centenario del primer artículo de A. Einstein sobre la Teoría Especial de la Relatividad (TER), la Unión Internacional de Física Pura y Aplicada (IUPAP) declaró el año 2005 como el año mundial de la física. La Teoría de la Relatividad, a pesar de ser centenaria, no suele formar parte del currículo de Cursos Introductorios de Física en Bachillerato y primer curso de Universidad. Sin embargo, sin esta teoría no serían posibles aplicaciones tecnológicas cada vez más cotidianas como los localizadores GPS en coches, trenes y otros vehículos, o bien la comprensión

de la producción energética de origen nuclear, ni una explicación cada vez mejor del Universo en que vivimos. Un conocimiento básico de esta teoría es necesario para la toma de decisiones con consecuencias tan duraderas para el medio ambiente como la producción de energía nuclear o el plan de telecomunicaciones. Ciertamente, no es el ciudadano medio que se acerca a los museos y exposiciones científicas interesado por la Teoría de la Relatividad quien tiene responsabilidades directas en materia de política energética, medioambiental o de telecomunicaciones. Pero este ciudadano medio sí necesita elementos con los cuales formarse una opinión fundada acerca de la energía nuclear y todo lo relacionado, que le permita observar con mirada crítica una noticia, un discurso pseudo científico o una fantasía científica.

Estas preocupaciones –interés por el aprendizaje no formal, la alfabetización científica, y conocimiento de temas científicos contemporáneos (la Teoría Especial de la Relatividad) con influencia en la vida cotidiana- nos ha llevado a preguntarnos si el aprendizaje informal en museos puede contribuir a una alfabetización científica dentro de la comprensión básica de procesos relacionados con la Teoría Especial de la Relatividad. Este trabajo trata de la enseñanza del tema de la Teoría Especial de la Relatividad en un seminario para estudiantes de primer curso de Ingeniería (estudiantes de 18-19 años) que incluyó una visita a la exposición “Centenario de la Teoría Especial de la Relatividad 1905-2005”. La exposición se desarrolló en el Kutxaespacio de la Ciencia de San Sebastián con la colaboración de la Universidad del País Vasco (Guisasola et al. 2005) y su objetivo era proporcionar información científica inteligible y contextualizada sobre los fundamentos de la Teoría Especial de la Relatividad y sus implicaciones tecnológicas y sociales. Los temas centrales de la exposición eran:

- La rapidez con que podemos transmitir la información
- Sistemas de referencia: simultaneidad de sucesos y medida del tiempo
- El problema del límite de la velocidad de la luz
- El origen de la energía nuclear

La intención de los diseñadores de la exposición (Guisasola et al 2005) era ayudar a los visitantes, en particular a los grupos de estudiantes a partir de 15 años, a generar con una base científica sus propias opiniones y justificaciones sobre problemas relacionados con las telecomunicaciones y las transformaciones nucleares. La exposición incluía simulaciones con experimentos mentales que pueden ser manipuladas, un módulo experimental sobre el famoso experimento de Michelson y Morley y paneles explicativos. Los paneles presentan ilustraciones en contextos cercanos a los visitantes, para captar su atención y utilizan analogías para explicar los principios científicos.

El presente trabajo se centra en las siguientes cuestiones de investigación:

- ¿Qué tipo de concepciones previas tienen los estudiantes sobre la Teoría Especial de la Relatividad y sus aplicaciones?
- ¿Cómo influye la visita al museo en la comprensión de los estudiantes sobre la Teoría Especial de la Relatividad y sus aplicaciones? ¿Se incrementa la comprensión de los estudiantes sobre esta Teoría? ¿Utilizan los estudiantes

argumentos más científicos en la discusión de temas relacionados con la Teoría Especial de la Relatividad, después de la visita a la exposición?

DISEÑO EXPERIMENTAL

Muestra

Un total de 35 estudiantes (63% chicos y 37% chicas) de primer curso de Ingeniería han participado en la experiencia. Estos alumnos estudian la asignatura de Física General en la universidad, y también estudiaron Física durante año y medio en el Bachillerato. No obstante, no han visto la Teoría Especial de la Relatividad en ninguno de los programas de física cursados, y tampoco está previsto que adquieran conocimiento sobre este tema en la enseñanza formal de la titulación.

Los estudiantes han sido elegidos de una clase impartida por un profesor que estaba colaborando en la exposición "*Centenario de la Teoría Especial de la Relatividad 1905-2005*" del Museo Kutxaespacio de la Ciencia. Estos estudiantes realizaron un seminario de 4 horas y una visita a la exposición. Como la experiencia no está incluida dentro del programa oficial del curso, se puede asumir que el profesor probablemente se implicó más de lo habitual en motivar a los estudiantes y en presentar actividades relevantes.

Secuencia de Enseñanza

Para diseñar la secuencia de enseñanza nos hemos basado en el 'contextual model of learning' de Falk y Dierking (1992, 2000) que incorpora muchos elementos de lo que conocemos sobre el aprendizaje. El modelo presta atención simultáneamente a múltiples contextos, situándolo en un marco útil para analizar la naturaleza del aprendizaje, en concreto en espacios no escolares. Se enfatiza en que el aprendizaje está situado en un contexto y que en ausencia de una indicación externa las asociaciones de cada individuo pueden ser no significativas. Aprender no es una experiencia que se realiza en abstracto sino en una situación concreta del mundo real, combinando contextos personales, socioculturales y físicos. Los visitantes de un museo son considerados como personas activamente implicadas en la construcción y reconstrucción de estos contextos. El modelo es, intencionadamente, más descriptivo que predictivo.

En la secuencia que presentamos se ha diseñado y puesto en práctica una unidad didáctica como puente entre el contexto escolar y el contexto del museo. Por ello, se diseñaron actividades para 'antes', 'durante' y 'después' de la visita, que proporcionan una secuencia unificadora de los diferentes contextos en que aprenden los estudiantes. Además, el tipo de actividades se ha diseñado teniendo en cuenta las posibilidades que ofrece cada situación en la escuela o en el museo. Así, las actividades pre y post-visita se basan más en el análisis y discusión de 'relatos' y cuestiones, mientras que las actividades en el Museo tratan de proporcionar a los estudiantes una oportunidad para experimentar, tratar de dar sentido e interés a los interrogantes planteados y para buscar información.

La unidad didáctica utilizada como instrumento de investigación en este trabajo se resume a continuación, indicando la secuencia implementada. A continuación, se presenta un resumen de las actividades pre y post-visita:

Actividades pre-visita (2 horas)

El profesor explica (10') que el objetivo del seminario es la divulgación científica de la Teoría Especial de la Relatividad (TER). En primer lugar, los estudiantes rellenan individualmente un cuestionario sobre algunos aspectos de la TER y sus implicaciones sociales, que se tratarán en el seminario (30') (**Anexo 1**). Una vez realizado el cuestionario se abre un debate sobre los cuatro problemas-Relatos diseñados: "Telecomunicaciones", "Tus segundos son más largos que los míos", "Muones ¿jóvenes o viejos?" y "Experimento en el CERN". Se expresan diferentes opiniones sobre la situación presentada. Los problemas-Relatos presentados siguen la secuencia que luego se verá en la exposición y que podemos resumir de la siguiente forma:

- "Las telecomunicaciones": ¿Es posible transmitir la información cada vez más rápido? ¿Este problema está relacionado con la Teoría Especial de la Relatividad?
- "Tus segundos son más largo que los míos": Galileo y el movimiento relativo, ¿Es posible que un fenómeno dure un tiempo diferente según desde donde lo observemos?, ¿La velocidad de la luz de una linterna es más rápida en un cohete a gran velocidad que fuera del cohete en reposo?
- "Muones ¿jóvenes o viejos?": un ejemplo práctico de medidas de tiempo distintas para un mismo fenómeno
- "Experimento en el CERN": Cuanta más fuerza le aplicamos a un cuerpo, ¿es siempre mayor su aceleración?. ¿Qué significa la famosa ecuación $E=mc^2$?. ¿Tiene alguna relación con la energía nuclear?

A continuación se presenta el primero de los relatos, que introduce la problemática de la velocidad de la luz y de las ondas electromagnéticas.

Relato 1: Las Telecomunicaciones

Imagina una operación de corazón o de transplante de órganos realizada en colaboración entre Osakidetza en Bilbao y un Hospital de Quito en Ecuador. Es vital para el buen éxito de la operación que llegue la información a través de las ondas electromagnéticas (video conferencia) en el menor plazo posible y en la mayor cantidad posible. Esto no es ciencia ficción, en el año 2001 se llevó a cabo la primera operación de telecirugía transoceánica. Un equipo de expertos del Instituto Europeo de Telecirugía de Francia llevó a cabo una operación desde Nueva York en una paciente de 68 años situada en Estrasburgo. Dos cirujanos dirigían desde Nueva York los robots, mientras que otros dos expertos situados en Estrasburgo se encargaban de controlar el sistema informático.

La información viajó 14.000 kilómetros, desde su punto de origen en Estados Unidos hasta su destino en Francia. Debido al tiempo que tardaba la información en recorrer esta distancia y al periodo de codificación de los datos en vídeo, los movimientos de los cirujanos aparecían en los monitores de televisión con un retraso de 155 milisegundos, "un tiempo comprendido dentro de los márgenes de seguridad que estiman como punto máximo los 330 milisegundos", señalaron los autores de la intervención.

Panel de mando en New York



Las ondas electromagnéticas, que son las que transportan la información, tardan un tiempo en viajar de un sitio a otro. También la luz, que es una onda electromagnética, tarda en viajar de un punto a otro un cierto tiempo.

Cada vez las posibilidades de comunicación y su rapidez aumentan y ya hablamos de un 'mundo global' y de la alta eficacia de las nuevas tecnologías de la información.

¿Crees posible que llegue un momento en que las comunicaciones se produzcan de forma instantánea? Explica tu opinión

Visita al Museo (1hora 30')

La visita se realizó dos días después de las actividades pre-visita. Se propuso a los estudiantes que vieran la Exposición y que buscaran información en ella que pudiera completar, reformar o cambiar las respuestas que habían realizado en el cuestionario pre-visita. La búsqueda de información en la Exposición tuvo una duración de una hora, y se realizó en grupos de 4 personas con la ayuda de un documento-guía diseñado para concretar la búsqueda de información en las cuestiones tratadas en la pre-visita. Durante la visita, los alumnos no sólo buscaron información sino que interaccionaron con las simulaciones y el módulo experimental de la exposición.

Actividades post-visita (2horas)

Estas actividades se desarrollaron en clase en la siguiente semana a la visita. Los estudiantes reflexionaron por grupos sobre la información y las experiencias vividas en la visita, y si su conocimiento sobre el tema había cambiado en relación con el cuestionario pre-visita. Posteriormente, tuvieron que realizar, de forma individual, un informe final que, entre otras cuestiones, se centraba en los siguientes aspectos de la TER:

- ¿Es posible transmitir información a velocidades mayores que la de la luz?, ¿Hemos llegado al límite de velocidad en las comunicaciones?
- ¿Puede existir un mismo fenómeno que dure tiempos diferentes según desde donde se observe? Pon un ejemplo y justifícalo.
- ¿Por qué la velocidad de la luz es la máxima posible en nuestro universo? Si empujáramos un objeto con mucha fuerza, ¿no podríamos superar esa velocidad?
- ¿Cuál es la relación entre masa y energía a muy altas velocidades? Pon un ejemplo y coméntalo.

Metodología

Es necesario destacar que el diseño experimental no consiste en un diseño habitual pre/post-test, ya que el propio instrumento de investigación (la unidad didáctica) es parte del tratamiento. Así pues, una diferencia que se observe entre los resultados del

pre-test y el post-test, que se interprete como un cambio en la comprensión del alumno, no puede ser atribuido únicamente a la visita al Museo sino al proceso global de enseñanza pre-visita, visita y post-visita. Este diseño experimental está concebido para ser coherente con los resultados de la investigación en enseñanza/aprendizaje de las ciencias en contextos no formales, que indican la necesidad de realizar puentes didácticos entre el currículo escolar y las visitas a Museos (Falk 1997).

Las respuestas escritas de los estudiantes a los cuestionarios e informes fueron analizadas cualitativamente tomando como referentes categorías de respuesta mostradas en otros trabajos de investigación anteriores (Gil y Solbes 1993, Ramada et al. 1996, Villani y Arruda 1998) que fueron matizadas y reformuladas a lo largo del proceso (Ericsson y Simon 1984, Jong 1995, Kvale 1996). Han sido identificadas las tendencias comunes en las respuestas de los estudiantes y anotados ejemplos representativos de las mismas.

CONOCIMIENTOS DE LOS ESTUDIANTES SOBRE LA TEORÍA ESPECIAL DE LA RELATIVIDAD Y SUS APLICACIONES

Una de las preguntas de investigación de este trabajo es tratar de identificar los conocimientos y actitudes de los estudiantes sobre la TER. En esta sección presentamos algunas de las concepciones encontradas en los estudiantes. Todas las concepciones que se presentan son tendencias comunes a un mínimo de 10 estudiantes.

En el caso de la Teoría Especial de la Relatividad, los estudiantes se encuentran ante una situación nueva, no intuitiva y poco predecible. El proceso de comprensión de esta teoría suele generar cierta ansiedad, ya que no se puede acudir a experiencias cotidianas para aceptar su plausibilidad o corroborar su eficiencia (Toledo, Arriaseco y Santos 1997, Alemañ 1997, Pérez y Solbes 2003). En la enseñanza formal, diferentes estudios destacan las dificultades de los estudiantes de secundaria (14-18 años) para adquirir una visión abstracta de los conceptos de espacio y tiempo, que se diferencien de las explicaciones limitadas por la percepción y marcos absolutos de referencia (Castells y Pinto 2001, Saltiel y Malgrane 1980). También para los estudiantes de primeros cursos de universidad, analizar el movimiento desde un sistema de referencia exterior a uno mismo es algo que se consigue sólo con bastante entrenamiento (Galili y Kaplan 1997).

La relación entre masa y energía es tratada por los estudiantes como una mera relación entre magnitudes, ignorando su equivalencia o estableciendo una identidad entre las mismas. Los estudiantes no suelen ser capaces de razonar adecuadamente acerca de la energía en procesos de fisión nuclear. Así mismo, los estudiantes no suelen conocer aplicaciones de la TER y coherentemente, suelen indicar que su conocimiento es de escaso valor para ellos y para la ciencia.

En el presente trabajo las tendencias más comunes de los estudiantes respecto al conocimiento de la TER y sus aplicaciones se muestran en el cuadro 1.

Concepciones (Número de informes, N=35)	Ejemplos de respuestas
1. Se considera una teoría alejada de la experiencia cotidiana (N=10) y confiesan que no conocen la teoría o no contestan (N=17)	1. "No sé concretamente en qué consiste la teoría, mucha gente habla de ella pero nadie dice lo que es exactamente. Creo que se aplica en cuestiones de viajes espaciales..."
2. Sólo 15 (43%) estudiantes mencionan entre 1 y 3 aplicaciones de la Teoría (10 exploración espacial, 7 energía nuclear, 2 láser y 2 bomba atómica)	2. "Se aplica en la obtención de energía nuclear, bien en forma de bomba atómica o como fuente de energía. En el estudio del espacio, agujeros negros..."
3. Noción de que las comunicaciones pueden llegar a ser instantáneas (no hay límite para la velocidad de las comunicaciones) (N=23).	3. "Las comunicaciones llegarán a ser instantáneas, ahora no lo son por problemas técnicos que se superarán en el futuro".
4. Confusión entre sistemas de referencia y cuerpos en movimiento (N=20), cuando tienen que explicar que un mismo fenómeno puede durar tiempos diferentes.	4. "...que dos relojes situados en sistemas de referencia que se mueven a diferente velocidad marquen tiempos diferentes, es debido a que la velocidad depende del espacio y del tiempo. Dependiendo a que velocidad se mueve el cuerpo tardará tiempos diferentes..."
5. Cuando se les pide que expliquen con palabras el significado de la ecuación $E=mc^2$ el 65% (N=23) realiza descripciones superficiales de la fórmula y sólo 5 estudiantes le dan un significado físico.	5. "...la energía cinética es igual a la masa del cuerpo por la velocidad al cuadrado a la que se desplaza"

Cuadro 1. *Preconcepciones de los estudiantes detectadas en el cuestionario pre-visita*

La gran mayoría de los estudiantes confiesa su ignorancia sobre la TER y lo confirman cuando se les pregunta sobre el significado de la ecuación $E=mc^2$ (ítem 4 del cuestionario). En este ítem se les pide que expliquen el siguiente enunciado: "Einstein afirma que no siempre que se aumenta la fuerza total sobre un cuerpo se aumenta la aceleración de dicho cuerpo". La mayoría de los estudiantes razona de acuerdo con la segunda ley de Newton de la física clásica y concluye que para ellos no tiene sentido la afirmación de Einstein.

Esta misma ignorancia se refleja a la hora de conocer sus aplicaciones. Sólo una minoría de estudiantes sabe indicar alguna aplicación. Este resultado es coherente con la visión que tienen de la TER como algo alejado de la vida cotidiana (Pérez 2003).

Respecto a la velocidad de la luz, la mayoría de estudiantes no se plantea la cuestión de un límite para la velocidad de la luz o las ondas electromagnéticas. Este resultado es coherente con estudios que indican que en la enseñanza de la óptica y la cinemática no se abordan problemas relacionados con la medida de la velocidad de la luz y su relevancia epistemológica (Villani y Arruda 1998).

No saben distinguir entre sistema de referencia y cuerpo en movimiento y en consecuencia, no entienden lo que significa medir el tiempo en sistemas de referencia que se mueven con velocidades diferentes. Este resultado coincide con varios estudios

que indican las dificultades de los estudiantes para entender el significado de Sistema de Referencia Inercial en el marco de la física clásica (Galili y Kaplan 1997; Saltiel y Malgrane 1980).

El concepto de energía es uno de los más fructíferos y unificadores de la física y de uso común en la tecnología, la cultura y la sociedad. Quizá esto explique por qué la ecuación más famosa de la ciencia es $E = mc^2$. Sin embargo, el concepto de energía es también uno de los más complejos en cuanto a dificultades de aprendizaje y de enseñanza (Doménech et al. 2005). Estas dificultades se reflejan en las respuestas de los estudiantes obtenidas en el cuestionario pre-visita, donde la mayoría de ellos no encuentra un significado a la ecuación de Einstein. Este resultado es convergente con el estudio de Solbes y Tarín (2004) en el que se muestra que la equivalencia masa-energía, tal y como aparece en la Teoría Especial de la Relatividad, no es comprendida por los estudiantes de último curso de Secundaria (18 años), quienes no saben justificar correctamente la equivalencia entre masa y energía que predice la ecuación de Einstein.

POTENCIAL DE LA EXPOSICIÓN PARA INFLUIR EN EL CONOCIMIENTO DE LOS ESTUDIANTES

La segunda pregunta de investigación trata sobre el potencial de la exposición, en combinación con el tratamiento pre y post-visita en el aula, para influir en las concepciones de los estudiantes sobre la TER.

En primer lugar, nos referiremos a la cuestión de si las visitas a museos pueden influir en el cambio conceptual y la comprensión de los principios científicos. La mayoría de los estudiantes indica explícitamente en su informe post-visita que su conocimiento de la teoría especial de la relatividad y sus aplicaciones ha aumentado:

Ejemplo de respuesta 1

"...la visita a la exposición me ha hecho comprender por qué la velocidad de la luz en el vacío es la máxima que se puede alcanzar. No creía que la teoría de la relatividad se ocupara de esta cuestión. Me ha sorprendido la simulación que justifica que el mismo reloj pueda marcar tiempos diferentes en sistemas de referencia distintos. Además, he visto aplicaciones interesantes como las de los muones y los elementos radiactivos..."

De los comentarios de los estudiantes parece deducirse que hay una convicción subjetiva de que se han conocido nuevos datos y experiencias que les ha ayudado a comprender mejor algunos aspectos de la Relatividad. Los estudiantes expresan una mejor actitud hacia la utilidad social de la TER.

Una cuestión interesante era conocer si algunas de las preconcepciones o ideas distorsionadas de los estudiantes habían cambiado como resultado del seminario con visita realizado. La categorización y análisis del cuestionario pre-visita y de los informes post-visita de los estudiantes dieron diferencias en algunas cuestiones que se resaltaban en los objetivos de aprendizaje del Seminario-visita y se exponen en el cuadro 2.

Aspectos de la TER contemplados en la exposición	Pre-visita (%)	Post-visita (%)
1. La velocidad de la luz tiene un límite y es constante.	15%	71% Argumentan correctamente: -De forma factual con el experimento de Michelson & Morley: 47% -Cualitativamente con el ejemplo del "cohete y la linterna" de la exposición: 34% -Con las fórmulas de equivalencia de tiempos en sistemas de referencia diferentes que se indican en la exposición: 75%
2. Entienden comprensivamente que un mismo fenómeno puede durar tiempos diferentes según el sistema de referencia.	15%	69% Argumentan correctamente: -Con el ejemplo de los muones de la exposición: 50%
3. Entienden de forma cualitativa la ecuación $E = mc^2$	6%	59% Argumentan: -Con la simulación del CERN de la exposición: 31% -Cualitativamente diferenciando entre masa en reposo y masa a grandes velocidades: 31% -Cualitativamente razonando sobre la imposibilidad de obtener mayor aceleración al aplicar más fuerza: 38%

Cuadro 2. Diferencias en las concepciones de los estudiantes antes y después de la visita a la exposición.

En la mayoría de los informes post-visita los estudiantes explican que no es posible la transmisión instantánea de la información debido a que las ondas electromagnéticas o la luz tienen una velocidad límite. Los estudiantes utilizan argumentos expuestos en la exposición:

Ejemplo de respuesta 2

"Las ondas electromagnéticas tardan un tiempo en viajar a través del espacio como hemos visto en la simulación "planetas"... Además al ver la relatividad del tiempo según el sistema de referencia llegamos a la conclusión de que la velocidad de la luz tenía un límite y es constante..."

A la hora de justificar la velocidad límite de la luz, los estudiantes utilizan diferentes razonamientos. Algunos se refieren a la experiencia como verificadora de su afirmación:

Ejemplo de respuesta 3

"Michelson y Morley utilizaron la velocidad de rotación de la tierra respecto del Sol para lanzar un rayo de luz en el sentido del movimiento y otro rayo en una dirección perpendicular. Al realizar el experimento comprobaron que los dos rayos tardaban lo mismo en recorrer una determinada distancia. Así se concluyó que la velocidad de la luz es constante en cualquier sistema de referencia que se elija y, en el vacío, nunca mayor de 300.000 Km/s. ... Si miramos el ejemplo de la exposición, lo que Michelson y Morley comprobaron era que la velocidad de la luz emitida por la linterna era la misma cuando estaba en reposo que cuando se emitía desde el cohete."

En todos los informes con justificaciones basadas en la teoría especial de la relatividad aparecen las ecuaciones que había en la exposición:

Ejemplo de respuesta 4

"Porque cuando la velocidad es muy grande, parecida a la de la luz, Einstein indica que la transformación de Galileo no se cumple. En el caso de la linterna y el cohete, no se cumple que la velocidad de la linterna será:

$v_{luz} = c + v_{cohete}$, sino que de acuerdo con la ecuación de Einstein, si suponemos que la velocidad del cohete es $0,9c$, tenemos que:

$$v_{luz} = \frac{0,9c + c}{1 + \frac{0,9c^2}{c^2}} = \frac{1,9c^3}{1,9c^2} = c "$$

Sin embargo, en otros informes (alrededor del 30%) los estudiantes afirman que no es posible la transmisión instantánea de la información pero no justifican el hecho de la velocidad límite de la luz. Estos estudiantes utilizan la información de la exposición pero no son capaces de integrarla en la explicación científica de la teoría de la relatividad:

Ejemplo de respuesta 5

"... si la información tiene que recorrer grandes distancias no puede ser instantánea ya que la onda electromagnética (luz) debe tardar un tiempo y tiene una velocidad límite..."

Cuando el aspecto tratado es el de la medida de intervalos de tiempo diferentes para un mismo fenómeno según el sistema de referencia elegido, alrededor de la mitad de los informes emplea justificaciones de acuerdo con la teoría, explicando el ejemplo que sobre la vida media de los muones y el número que llegan a la superficie de la tierra, se describía en la simulación "Tiempo" de la exposición:

Ejemplo de respuesta 6

"El muón tiene una velocidad próxima a la de la luz. Entonces, si medimos el intervalo de tiempo que tarda un muón en llegar a la tierra desde una altura de 15 km de la superficie terrestre, el intervalo de tiempo medido en el sistema de referencia del propio muón es diferente del que medimos desde la superficie de la Tierra. Desde nuestro sistema terrestre el reloj del muón marca tiempos más lentos que nuestro reloj..."

En cuanto a la relación entre masa y energía que expresa la famosa ecuación de Einstein, casi el 60% de los informes post-visita realiza argumentaciones basadas en datos o en la Teoría de la Relatividad Especial:

Ejemplo de respuesta 7

"En la simulación "energía" hemos visto que en el laboratorio del CERN cuando las partículas obtienen grandes velocidades la masa y energía son equivalentes y dan lugar a nuevas partículas..."

Ejemplo de respuesta 8

"La ecuación de Einstein nos indica que la masa y la energía son equivalentes. Cuando un cuerpo se mueve a altas velocidades la energía que se le comunica puede transformarse en aumento de masa y viceversa, una disminución de masa puede llevar asociado una fuerte emisión de energía dado por $E = (masa\ perdida) c^2$."

Ejemplo de respuesta 9

"El valor de la inercia del cuerpo se hace enorme cuando el objeto que queremos acelerar se mueve ya a velocidades muy próximas a la de la luz, de forma que por mucha energía que gastemos no conseguiremos aumentar su velocidad..... este hecho nos indica que la masa de un objeto aumenta con la velocidad de éste, es decir, que existe una relación entre la masa y la energía cinética del objeto. Einstein reflejó esta relación en su famosa ecuación."

El argumento de la respuesta 7 es correcto. Los otros dos son un típico ejemplo en el que encontramos en los estudiantes una mezcla de argumentos correctos y la idea incorrecta, pero muy extendida, como ponen de manifiesto diversas investigaciones (Alemañ 1997, Pérez y Solbes 2003), de variación de la masa con la velocidad. Esto puede ser debido a que, como señalan Pérez y Solbes (2006), "se da una importante introducción de conceptos hoy superados como la masa relativista" presente en más del 80 % de los textos de Física de 2º de Bachillerato, "con muy diversos y contradictorios enfoques sobre su significado". Pero el consenso actual sólo utiliza la masa en reposo o invariante y muchos libros de Física general que en ediciones anteriores utilizaban la masa relativista ahora han dejado de hacerlo. Einstein, a partir de la introducción del espacio-tiempo por Minkowski desaconsejaba, de una manera categórica, el uso de la masa dependiente de la velocidad: "No es bueno introducir el concepto de masa $M = m/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ de un cuerpo en movimiento por no ser una definición clara. Es mejor no introducir otro concepto de masa que 'la masa en reposo' m . En vez de introducir M es mejor hacer mención a la expresión del momento y la energía de un cuerpo en movimiento" (citado por Okum 1989).

Hay que mencionar que alrededor del 50% de los informes post-visita se sigue sin emplear, en alguno o en todos de los tres aspectos considerados, los nuevos datos que les aporta la exposición, quizás porque los alumnos mantienen sus ideas erróneas sobre la medida del tiempo en sistemas de referencia diferentes.

Así mismo, en una proporción similar de informes post-visita no se emplea, en alguno de los aspectos o en todos, una argumentación científica en la justificación de sus afirmaciones. De acuerdo con Jiménez-Aleixandre et al. (2000) entendemos por argumentación la capacidad de relacionar datos y conclusiones, de evaluar enunciados teóricos a la luz de los resultados empíricos, de redactar informes, etc. Se observa una gran diferencia en el empleo de argumentaciones científicas y en la mención de aplicaciones científico-técnicas con implicaciones sociales (ver figura 1)

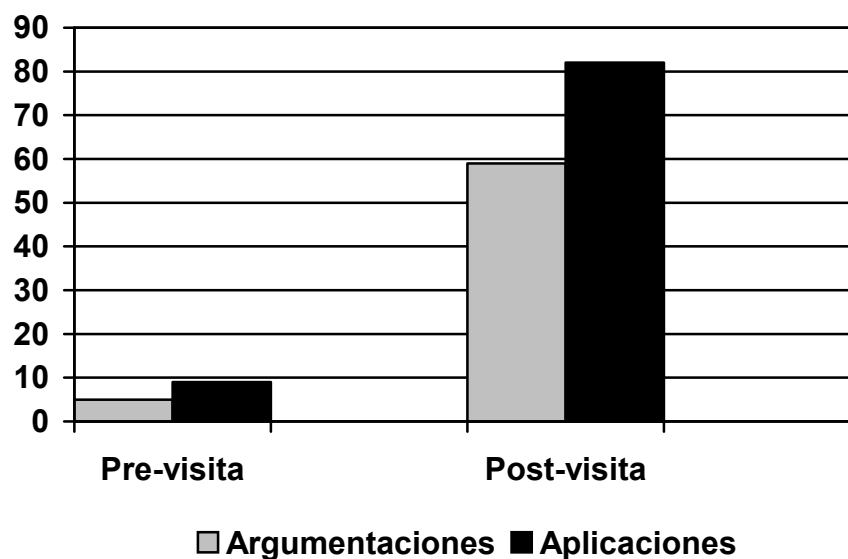


Figura 1. Las columnas en gris indican la proporción de informes en los que se argumenta científicamente en al menos 2 de los 3 aspectos considerados en la exposición, antes y después de la visita al Museo. Las columnas en negro indican la proporción de informes en los que se señalan 3 o más aplicaciones de la teoría de la relatividad especial, antes y después de la visita respectivamente.

Aunque los estudiantes de primer curso de Ingeniería no han recibido instrucción previa sobre TER, tienen un bagaje de conocimientos científicos mayor que la media de la ciudadanía. Sin embargo, en el cuestionario pre-visita ha sido poco frecuente encontrar razonamientos científicos que apoyaran las afirmaciones que realizaban. Así mismo, en las clases de la universidad española al menos, no suele ser frecuente que los estudiantes tengan oportunidades de argumentar y justificar científicamente sus ideas (Guisasola et al. 2003). Sin embargo, en este trabajo se ha mostrado que cuando se les proporciona a los estudiantes información y cuestiones adecuadas para argumentar, hay un incremento notable en el uso de razonamientos científicos para defender sus ideas.

Los estudiantes no utilizan siempre la información que se les suministra para el desarrollo del conocimiento previsto por los diseñadores de la exposición. En las simulaciones y los paneles que explicaban la famosa ecuación de Einstein, los estudiantes entienden la equivalencia entre masa y energía como identificación:

Ejemplo de respuesta 10

"La fórmula $E = mc^2$ nos indican que la masa y la energía son los mismo..."

Ejemplo de respuesta 11

"La fórmula $E = mc^2$ permite obtener energía nuclear ya que masa y energía son iguales..."

En otros paneles y simulaciones que contaban el experimento mental de Einstein sobre relojes y medidas de tiempo en diferentes sistemas de referencia, los

estudiantes tenían que comprender la contracción o alargamiento del tiempo en sistemas de referencia diferentes. Sin embargo, muchos estudiantes concluían:

"Parece que los relojes en reposo y en el tren miden tiempos diferentes para un mismo hecho, pero esto es una explicación, no creo que suceda realmente..."

"La formula de Einstein de equivalencia de tiempos da como resultado medidas de tiempo distintos, pero esto es difícil de creer. Yo no creo que el tiempo se dilate o contraiga 'realmente'..."

Estas respuestas coinciden con estudios de preconcepciones donde se muestra que los estudiantes no razonan en términos de propiedades del espacio-tiempo sino que su estructura mental requiere de propiedades fijas (las distancias medidas son independientes del sistema de referencia, Villani y Pacca 1987), de cuerpos extensos para una visión realista de la naturaleza (Gil y Solbes 1993). El estudiante admite que diversos observadores "parecen" obtener medidas diferentes, pero en "realidad" hay sólo una medida del espacio, del tiempo o de la velocidad de la luz. Hewson (1982) mostró cómo incluso a los propios profesores les resulta difícil cambiar la concepción alternativa de espacio y tiempo absolutos.

Estas respuestas erróneas u otras inesperadas, muestran que invitar a los visitantes de la exposición a integrar la información de los paneles y simulaciones para formarse su propia opinión y conclusiones no conduce siempre a los objetivos deseados. En la presente investigación, debido al marco teórico elegido, era claro que las preconcepciones de los estudiantes sobre relatividad influirían en la interpretación de la exposición. Así mismo, los dos últimos ejemplos muestran que los estudiantes integran el nuevo conocimiento científico con otro tipo de conocimiento con valores epistemológicos y morales para formarse una opinión sobre una teoría científica y su relación con la sociedad. Así, los estudiantes admiten y utilizan la explicación científica de que los relojes pueden marcar tiempos diferentes en sistemas de referencia diferentes: *"Parece que los relojes en reposo y en el tren miden tiempos diferentes para un mismo hecho"*, *"La formula de Einstein de equivalencia de tiempos da como resultado medidas de tiempo distintos"*. Sin embargo, no integran la explicación en su sistema de creencias: *"no creo que suceda realmente"*, *"Yo no creo que el tiempo se dilate o contraiga 'realmente' "*.

IMPLICACIONES DIDÁCTICAS

Los resultados obtenidos sugieren algunas implicaciones prácticas para las relaciones entre educación científica y museos de la Ciencia.

El conocimiento de las concepciones previas de los estudiantes puede servir a los profesores y diseñadores de exposiciones para conocer aquellos conceptos y teorías que ofrecen mayores dificultades de aprendizaje. La investigación en concepciones alternativas ha mostrado que estas concepciones son similares en diferentes países y a lo largo de las diferentes edades escolares. Los educadores de los museos deberían conocer las posibles concepciones alternativas de los visitantes respecto a los temas de los módulos y exposiciones, ya que estas concepciones podrían interferir en el proceso de transmisión de información y de construcción de los conocimientos científicos, que se pretende lograr.

El enfoque de la visita en diferentes fases ('antes', 'durante' y 'después') y englobadas en una unidad didáctica, que proporciona a los estudiantes actividades y 'relatos' como punto de partida de su reflexión sobre problemas relacionados con el conocimiento científico, se ha mostrado útil a la hora de 'guiar' la búsqueda de información en la exposición y el análisis de dicha información. Parece razonable plantear que este tipo de enfoque es útil para fomentar la construcción de significados en visitas escolares a museos de ciencia. Los resultados de esta investigación convergen con otros estudios sobre aprendizaje en contextos no formales basados en una concepción similar del aprendizaje en esos contextos (Henriksen y Jorde 2001, Allen 2004, Pedretti 2004).

La visita a la exposición ha aumentado claramente el conocimiento y comprensión de los estudiantes sobre la teoría especial de la relatividad y sus aplicaciones. Sin embargo, también se han detectado algunos problemas respecto a la introducción de nuevos conceptos en el museo y a su integración en un modelo científico. Será necesario revisar los objetivos de cada panel y simulación de la exposición, así como el programa seguido antes y después de la visita. Esto implica una colaboración estrecha entre educadores del museo, diseñadores de los módulos y exposiciones y profesores.

Es preciso señalar que sólo alrededor de la mitad de los estudiantes de primer curso de Ingeniería involucrados en este estudio ha mostrado habilidades para argumentar y justificar científicamente sus ideas y sus valoraciones sobre la TER. Esto puede ser debido a la falta de costumbre de los estudiantes en argumentar sus ideas y en justificar sus opiniones sobre hechos o cuestiones científicas en las clases de ciencias. Proporcionar a los estudiantes experiencias junto con información para que expresen opiniones razonadas sobre teorías científicas y sus aplicaciones, es una de las principales componentes de una educación científica para la alfabetización científica. Cuando se diseñan programas de visitas escolares a museos se debe poner especial cuidado en los aspectos que relacionan la información de conceptos científicos con la argumentación científica.

En este trabajo ha existido una estrecha relación entre los diferentes estamentos implicados en la exposición en el museo y los diseñadores de la unidad didáctica. Además, el profesor que ha realizado la experiencia ha participado en el diseño y desarrollo de la exposición. Sin embargo, esto no suele ser lo habitual, el profesorado suele tener poca información de los objetivos de la exposición y los educadores del museo no suelen tener una información concreta de la problemáticas de los diferentes niveles escolares.

REFERENCIAS

- ALLEN S. (2004) Designs for learning: Studying science museum exhibits that do more than entertain. *Science Education*, 88(Suppl.1) S17-S33.
- ALEMAÑ, R. (1997). Errores comunes sobre relatividad entre los profesores de enseñanza secundaria. *Enseñanza de las Ciencias*, 15(3), 301-307

- HEWSON, P.W. (1982). A case study of conceptual change in special relativity: The influence of prior knowledge in learning. *European Journal of Research in Science Education*, 4(1), 61-78.
- HOFSTEIN, R. y ROSENFELD, S. (1996) Bringing the gap between formal and informal science learning. *Studies in Science Education* 28, 87-112
- JEFFERY-CALY K.R. (1998). Constructivism in museums: How museums create meaningful learning environments. *Journal of Museum Education*, 23(1), 3-7
- JIMÉNEZ-ALEIXANDRE, M.P., BUGALLO, A. y DUSCHL, R.A. (2000). "Doing the lesson" or "doing Science": Argument in High School Genetics. *Science Education*, 84, 757-792.
- JONG, O. de (1995). Classroom protocol analysis: A fruitful method of research in science education, European Research in Science Education II, Proceedings of the Second Ph.D. Summer School, Edited by D. Psillos, Aristotle University of Thessaloniki, Greece.
- KVALE S. (1996). Interviews. An introduction to qualitative research interviewing. Thousand Oaks, CA: Sage Publications.
- LUCAS A.M. (1983). Scientific literacy and informal learning. *Studies in Science Education* 10, 1-36
- MCMANUS P.M. (1992). Topics in museums and science education. *Studies in Science Education* 20, 157-182.
- MORENO, A. (Comisario) (2005). Exposición *De Einstein al Futuro*, Real Jardín Botánico, Madrid, 3/10 - 2/12.
- OKUM, L.B. (1989). The concept of mass. *Physics today*, 42, 31-36.
- PEDRETTI E. G. (2002). T. Kuhn meets T. Rex: Critical conversations and new directions in science centres and science museums. *Studies In Science Education* 37, 1-42.
- PEDRETTI, E. G. (2004). Perspectives on learning through research on critical issues-based science center exhibitions. *Science Education* 88(Suppl. 1) S34-S47.
- PÉREZ, H. (2003). *La teoría de la relatividad y su didáctica en el Bachillerato: Análisis de dificultades y una propuesta de tratamiento*. Tesis doctoral. Universidad de Valencia. En web: http://www.tdx.cesca.es/TESIS_UV/AVAILABLE/TDX-0713104-143220//perez.pdf (consultada en mayo 2006).
- PÉREZ, H. y SOLBES J. (2003). Algunos problemas en la enseñanza de la relatividad. *Enseñanza de las Ciencias*, 21 (1), 135-146
- PÉREZ, H. y SOLBES J. (2006). Una propuesta sobre enseñanza de la relatividad en el bachillerato como motivación para el aprendizaje de la física. *Enseñanza de las Ciencias*, 24 (2), 260-284.
- RAMADA J., BARVE S., KUMAR A. y BABA, H. (1996). Alternative conceptions in galilean relativity: Distance, time, energy and laws. *International Journal of Science Education*, 18(4), 463-477
- RENNIE L.J. y McCLAFFERTY T.P. (1996). Science centres and science learning. *Studies in Science Education*, 27, 53-98.
- SALTIEL, E. y MALGRANE J.L. (1980). Spontaneous ways of reasoning in elementary kinematics. *European Journal of Physics*, 2, 73-80

- SOLBES J. y TARÍN F. (2004). La conservación de la energía: un principio de toda la física. Una propuesta y unos resultados. *Enseñanza de las Ciencias*, 22(2), 185-194.
- TOLEDO, B., ARRIASSECO I. y SANTOS G. (1997). Análisis de la transición de la física clásica a la relativista desde la perspectiva del cambio conceptual. *Enseñanza de las Ciencias*, 15(1), 79-80
- UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC, AND CULTURAL ORGANIZATION (UNESCO) Project 2000+: Scientific and technological literacy for all (<http://unesdoc.unesco.org/images/0009/000977/097743eo.pdf>)
- VILLANI A. y ARRUDA S. (1998). Special theory of relativity and the History of Science. *Science & Education* 7(1), 85-100
- VILLANI A. y PACCA J.L.A. (1987). Students' spontaneous ideas about the speed of light. *International Journal of Science Education*, 1, 55-66

ANEXO

CUESTIONARIO PRE-VISITA DE LA UNIDAD DIDÁCTICA

1. Cada vez las posibilidades de comunicación y su rapidez aumentan y ya hablamos de un 'mundo global' y de la alta eficacia de las Nuevas Tecnologías de la Información. ¿Crees posible que llegue un momento en que las comunicaciones se produzcan de forma instantánea?
2. Este año se celebra el año mundial de la Física coincidiendo con el Centenario de la publicación de la "Teoría especial de la relatividad" por Albert Einstein en 1905. ¿Cuáles son las ventajas que ha aportado a la Sociedad esta Teoría? Señala tres aplicaciones prácticas.
3. Una de las afirmaciones más famosas de la teoría de la relatividad de Albert Einstein es que dos relojes situaciones en sistemas de referencia que se mueven a diferente velocidad marcan tiempos distintos. ¿Cómo se lo explicarías a tu hermano/a pequeño/a con un ejemplo?
4. Según la revista norteamericana TIME la ecuación más famosa del siglo XX es: " $E= mc^2$ ". ¿Sabrías explicar con palabras, no con más fórmulas, lo que significa esta ecuación? Indica un ejemplo de aplicación de esta ecuación.

SUMMARY

The problem which we are tackling in this work emerges from three different concerns: the importance of 'learning science 'informally' as part of the school curriculum, the need for scientific literacy and the importance of the social implications of contemporary science. An exhibition was used in the Kutxaespacio Science Museum in San Sebastian on the centenary of the Spatial Theory of Relativity to design a visit for first year Engineering students and assess the learning which is achieved. The first part of the work presents the design which was produced to build bridges between formal teaching and the exhibition visit. The second part analyses the potential of the exhibition and the aforementioned design to influence the student's knowledge regarding three aspects of the Spatial Theory of Relativity. The results obtained demonstrate that the visit design with activities beforehand and afterwards is effective in terms of increasing students' understanding and stimulating their ability to argue scientifically.

Key Words: *Informal learning; Special Relativity; Visits to Museum.*