

UNIVERSITAT DE VALÈNCIA  
DEPARTAMENT DE DIDÀCTICA  
DE LES CIÈNCIES EXPERIMENTALS



**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.**

LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD Y SU ENSEÑANZA EN EL BACHILLERATO:

ANÁLISIS DE DIFICULTADES Y LÍNEAS PARA UNA PROPUESTA DE TRATAMIENTO.

por:

HÉCTOR PÉREZ CELADA

Dirigida por:

JORDI SOLBES MATARREDONA.

Unas pocas preguntas pueden sembrar la confusión. “¿Existe el pasado? No. ¿Existe el futuro? No. ¿ Sólo existe el presente, entonces? Sí. Pero dentro del presente, ¿No transcurre el tiempo? *Exactamente*. ¿Entonces no existe el tiempo? ¡Oh, no se ponga usted pesado!. (Bertrand Russell: El conocimiento humano 1983).

## PRESENTACIÓN

El propósito de esta memoria es estudiar las características de la enseñanza de los fundamentos de la Teoría de Relatividad en el bachillerato, y sentar las bases para una posterior propuesta fundamentada, que introduzca con mayor eficacia este tema.

La importancia intrínseca del tema y su enseñanza es evidente, por cuanto:

- I. Permite formar una visión evolutiva de la física
- II. Facilita la comprensión de la física clásica, en especial, de los conceptos de espacio, tiempo, energía (Solbes y Tarín 2000)
- III. Junto con la física cuántica, constituye no sólo la base de la física moderna, sino los marcos en el interior de los cuales deben ser elaboradas las nuevas teorías (toda teoría fundamental debe ser invariante bajo transformaciones de Lorentz y debe estar cuantizada)

Con relación al primer propósito se formulará la hipótesis de que: “ Los conceptos de tiempo y espacio, sus propiedades, así como los distintos sistemas de referencia, se introducen ya desde los niveles inferiores de la secundaria de forma desestructurada, acrítica y poco reflexiva. La enseñanza de la Teoría de la Relatividad se realiza de forma poco clarificadora, sin tener en cuenta las preconcepciones de los alumnos, y sin resaltar su posición en la estructura de la Física. En consecuencia, el aprendizaje es escasamente significativo y no se consolidan las nuevas concepciones en los estudiantes”.

Para fundamentar esta hipótesis se recurrirá a la investigación didáctica en sus diversas facetas: Por un lado, encuadrando la orientación de este trabajo en el marco teórico de lo que se ha venido a llamar consenso constructivista, y por otro, usando el gran caudal de investigaciones básicas sobre aspectos tales como la introducción de conceptos, preconcepciones o ideas previas, estrategias de cambio conceptual, CTS...

Las investigaciones específicas sobre aspectos de física moderna, y en concreto sobre la Teoría de la Relatividad, no son muy numerosas, e insertaremos esta en la línea trazada en nuestro ámbito por los trabajos de Gil y Solbes (Gil y Solbes 1993), imbricada a su vez en los debates internacionales sobre este campo.

Otro pilar de esta aproximación al problema planteado, y a la fundamentación de la hipótesis, es el recurso a la Historia de la Ciencia y su epistemología. Se justificará la utilización de estos recursos, un uso ya tradicional en la didáctica, y se señalarán aspectos de interés; entre ellos

podemos destacar la forma en que el desarrollo de la teoría y su difusión ha incidido en los enfoques didácticos. Se indagará acerca de los paralelismos que pueden trazarse entre las dificultades del desarrollo de la Teoría de la Relatividad y problemas análogos encontrados en los alumnos.

Para la contrastación de la hipótesis, se recurrirá a su operativización en derivaciones de la misma, susceptibles de contraste experimental, y al diseño de instrumentos variados y convergentes: Cuestionarios para profesores, de libros de texto, para estudiantes de diferentes niveles, etc. En su diseño se considerará la conexión entre los ítems y las derivaciones de las hipótesis, mediante un estudio detallado; matizando su alcance, sus criterios de corrección y fundamentos. Por último, se aplicarán a grupos pequeños. En una segunda fase de este trabajo podrán extenderse y ampliarse, mejorando la riqueza y amplitud de los diseños.

El estudio de los resultados obtenidos y la valoración de los mismos, en orden a la contrastación de la hipótesis, finaliza la primera fase recogida en este trabajo; se cerrará con el apunte de las líneas clave a seguir en una segunda fase que completará lo estudiado mediante una propuesta de tratamiento, en concordancia con el aprendizaje por investigación y con el manejo de situaciones problemáticas, que aparecen como núcleo central del modelo de enseñanza por investigación (Gil, Carrascosa et al, 1991).

## ÍNDICE

<b>PRESENTACIÓN</b>		<b>1</b>
<b>1</b>	<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>7</b>
1.1	LA PROBLEMÁTICA DE LA INTRODUCCIÓN DE LA FÍSICA MODERNA, Y LA RELATIVIDAD, EN EL BACHILLERATO. ....	8
1.2	LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN EN LA COMUNIDAD DIDÁCTICA. PRINCIPALES PROBLEMAS Y DEFICIENCIAS EN EL APRENDIZAJE.....	9
1.3	EL DEBATE ACERCA DE LA MASA RELATIVISTA. ....	11
1.3.1	<i>Argumentos que se han utilizado para defender el uso de la masa relativista. ....</i>	<i>12</i>
1.3.2	<i>Argumentos que muestran las limitaciones de la masa relativista. ....</i>	<i>13</i>
1.4	EL DEBATE ACERCA DE LA UTILIZACIÓN DE LA HISTORIA DE LA CIENCIA Y LA RELATIVIDAD. ....	16
1.5	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA: .....	17
<b>2</b>	<b>FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS, FUNDAMENTACIÓN</b>	<b>19</b>
2.1	FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS .....	19
2.2	FUNDAMENTACIÓN DE LA HIPÓTESIS.....	19
2.2.1	<i>REFLEXIÓN GENERAL SOBRE EL MARCO TEÓRICO DE LA DIDÁCTICA EN QUE SE SITÚA LA INVESTIGACIÓN. ....</i>	<i>19</i>
2.2.1.1	La enseñanza tradicional de la Física.....	20
2.2.1.2	Aportaciones clave de la investigación didáctica. Marco Teórico. ....	21
2.2.2	<i>FUNDAMENTACIÓN DIDÁCTICA DE LA HIPÓTESIS</i> .....	<i>25</i>
2.2.2.1	Ideas acerca de los conceptos de espacio y tiempo. ....	27
2.2.2.2	Acerca del principio de relatividad. ....	28
2.2.2.3	Acerca del marco de referencia. ....	28
2.2.2.4	Acerca de la velocidad de la luz .....	29
2.2.2.5	Ideas acerca de la masa.....	30
2.2.2.6	Acerca de la energía. ....	31
2.2.2.7	Dificultades sobre el manejo de relaciones funcionales y el estatus de las constantes en física .....	33
2.2.3	<i>FUNDAMENTACIÓN HISTÓRICA</i> .....	<i>33</i>
2.2.3.1	Las concepciones anteriores a la revolución científica. ....	34
2.2.3.2	La revolución científica y la posición newtoniana.....	36
2.2.3.3	Las aportaciones del barroco. ....	39
2.2.3.4	Los programas de investigación del XIX.....	40
2.2.3.5	Las aportaciones de Poincaré y Lorentz .....	41
2.2.3.6	La publicación en 1905 de la Teoría especial de la relatividad de Einstein. ....	42
2.2.3.7	El rechazo a la teoría del electrón de Lorentz y la aceptación final de la Teoría de la Relatividad. ....	44
2.2.3.8	Acerca de la posición de Einstein sobre el concepto de masa relativista .....	44

### **3 CONCRECIÓN Y OPERATIVIZACIÓN DE LAS HIPÓTESIS, DISEÑOS EXPERIMENTALES PARA SU CONTRASTE 47**

3.1	OPERATIVIZACIÓN DE LA HIPÓTESIS .....	47
3.1.1	<i>Operativización de la subhipótesis primera acerca de la forma en la que los libros de texto introducen la TER y sus fundamentos. ....</i>	48
3.1.2	<i>Operativización de la subhipótesis segunda acerca de la forma en la que los profesores introducen la TER y sus fundamentos. ....</i>	49
3.1.3	<i>Operativización de la subhipótesis tercera.....</i>	49
3.2	DISEÑO PARA CONTRASTAR LA SUBHIPÓTESIS PRIMERA .....	49
3.2.1	<i>Cuestionario de libros de texto.....</i>	50
3.2.2	<i>Comentario al cuestionario de libros de texto primer nivel. Criterios para la valoración de los ítems: .....</i>	53
3.2.3	<i>Comentarios al cuestionario de libros de texto 2º bachillerato. Criterios para la valoración de los ítems: .....</i>	56
	<i>Ubicación en el marco de la Física.....</i>	60
3.2.4	<i>Relación entre las subhipótesis operativas y los ítems del cuestionario de libros. ..</i>	70
3.3	DISEÑO PARA CONTRASTAR LA SUBHIPÓTESIS SEGUNDA.....	71
3.3.1	<i>Cuestionario destinado a profesores:.....</i>	71
3.3.2	<i>Estudio de los ítems del cuestionario destinado a profesores. Criterios de valoración de los ítems. ....</i>	72
3.3.3	<i>Relación entre las subhipótesis operativas y los ítems del cuestionario de profesores. 75</i>	75
3.4	DISEÑO PARA CONTRASTAR LA SUBHIPÓTESIS TERCERA.....	75
3.4.1	<i>Cuestionarios destinado a alumnos de primer nivel: .....</i>	75
3.4.2	<i>Comentarios de los cuestionarios de alumnos primer nivel. Criterios de valoración de los ítems. 76</i>	76
3.4.3	<i>Cuestionario para alumnos de 2º bachiller .....</i>	81
3.4.4	<i>Comentarios de los cuestionarios de ALUMNOS 2º de bachillerato . Criterios de valoración de los ítems. ....</i>	82
3.4.5	<i>Relación entre las subhipótesis operativas y los ítems del cuestionario de alumnos. 87</i>	87

### **4 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS 89**

4.1	RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CONTRASTACIÓN DE LA SUBHIPÓTESIS PRIMERA .....	89
4.2	VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CONTRASTACIÓN DE LA SUBHIPÓTESIS PRIMERA. ....	110
4.3	RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CONTRASTACIÓN DE LA SUBHIPÓTESIS SEGUNDA .....	111
4.4	VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CONTRASTACIÓN DE LA SUBHIPÓTESIS SEGUNDA.....	116
4.5	RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CONTRASTACIÓN DE LA SUBHIPÓTESIS TERCERA.....	116
4.6	VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CONTRASTACIÓN DE LA SUBHIPÓTESIS TERCERA.....	129

<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS</b>	<b>131</b>
5.1	CONCLUSIONES:.....	131
5.2	PERSPECTIVAS.....	132
<b>6</b>	<b>ANEXO: LIBROS DE TEXTO REVISADOS</b>	<b>135</b>
<b>7</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>137</b>
<b>8</b>	<b>ÍNDICE DE AUTORES</b>	<b>147</b>



## 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Teoría de la Relatividad se corresponde con uno de los dos grandes cambios que acaecieron en la física, hace aproximadamente un siglo; proporciona un marco de validez general para la forma de las leyes físicas, y el pensamiento acerca de los elementos básicos que conforman el mundo.

La Teoría se entronca con la tradición histórica de la relatividad de Galileo, y supone la generalización a todos los ámbitos de la Física, no sólo de la mecánica, de la invarianza de las leyes físicas respecto a los diversos sistemas de referencia. De paso, en su desarrollo, Einstein dio lugar a *“...una forma de ver la Física de una forma totalmente nueva. La invarianza y el principio de la relatividad pasaba a ser un requisito de las teorías, no una propiedad de ellas”*. (Sánchez Ron 1985).

La Teoría de la Relatividad ocupa una posición notable en muy diversos campos: La génesis de la teoría y su papel en la historia de la física proporcionan una oportunidad, ampliamente utilizada, para reflexionar acerca de la creación de ciencia, los mecanismos mediante los cuales elabora sus construcciones, la evolución de conceptos y paradigmas. Por otro lado, ilustra acerca de las relaciones física-cultura-sociedad; el impacto que provocó en la sociedad de los años 20 posiblemente *“sólo cabe equipararlo al que ocasionó la aparición de Origen de las Especies de Charles Darwin”* (Williams 1968). La importancia en el pensamiento filosófico, y en la cultura general, de la teoría (y sus mistificaciones) se prolonga hasta hoy.

Desde la perspectiva que nos ocupa, tanto en su propia fundamentación lógica como en su didáctica se ha de efectuar una reflexión crítica sobre los conceptos básicos de espacio, tiempo, etc. El afán por divulgar y enseñar los fundamentos de la teoría goza de una amplia tradición histórica en las exposiciones elementales de la relatividad, iniciada ya por el propio Einstein; no se le ha prestado en cambio, a pesar de buenas aportaciones, una atención paralela a su didáctica, especialmente en el tramo elemental que corresponde a la enseñanza secundaria.

Más recientemente, se está asumiendo en los currículum el paso desde una aparición un tanto superficial y anecdótica, a una mayor presencia y profundización, en correspondencia a su significación e importancia. Así, se ha introducido en el currículum de la enseñanza secundaria de nuestro país, por primera vez de forma expresa, un núcleo de contenidos relevante acerca de la física relativista. Esta inclusión adquiere la expresión legal de un bloque de contenidos, de rango equivalente a otras partes más tradicionales del currículum, y no formando parte de una mención genérica a la introducción a la física moderna. Aunque éstas desaparecen como mínimos en el denominado Decreto de Humanidades (Dic. 2000), por lo que se desconoce el grado en que persistirán en el currículum.

Este hecho conduce al problema de la eficacia de la práctica educativa, y de cuáles sean las principales dificultades conceptuales, el reto que esto supone es considerable. Desde la perspectiva didáctica, es ampliamente conocida la dificultad que para los alumnos supone el cambio, o evolución conceptual, desde las concepciones más espontáneas hacia el marco newtoniano, y de hecho, se señala a menudo la presencia de superposiciones entre el plano inconsciente y el plano formal explícito. El problema didáctico exige ahora un paso más, la superación de ese marco hacia otro, el einsteniano, que proporciona un amplio campo de predicciones en colisión con nuestro paradigma, tan costosamente elaborado, pero con la peculiaridad de que la mayoría de ellas se sitúa fuera del nivel cotidiano, o más inmediato, en que conformamos nuestras ideas, lejos de nuestro alcance.

Un aspecto importante del problema surge del cuestionamiento previo de la forma en que se incorporan los conceptos básicos a lo largo de enseñanza. Parece patente la necesidad de abordar cíclicamente, en espiral, la introducción de conceptos en la enseñanza secundaria, de la que el bachillerato forma parte; las nociones de espacio, tiempo, sistema de referencia, relatividad clásica, simetrías, conservación etc., deben abordarse creando las condiciones para la transición conceptual.

En esta tarea es preciso señalar la existencia de una tradición histórica en la enseñanza de la relatividad, heredera de los manuales tempranos sobre el tema; sin embargo, en los últimos años, se han abierto interesantes debates y perspectivas que rompen la uniformidad de los tratamientos. El reflejo del debate en los textos y en los enfoques didácticos crea diversidad de posiciones, incluso posibles confusiones; cabe efectuar por tanto un estudio y toma de posición ante los mismos.

Por último, en la fijación de las condiciones de partida de este trabajo, debe señalarse el propósito de efectuar propuestas didácticas que asuman la visión constructivista del aprendizaje, como corriente consolidada, y también abordar los últimos retos a los que se enfrenta la didáctica: Cómo integrar los nuevos canales de aprendizaje, la revolución informática, en la enseñanza.

Como paso previo a la formulación explícita del problema conviene repasar el marco en que se sitúa y tomar postura en los principales debates abiertos en este campo.

### **1.1 LA PROBLEMÁTICA DE LA INTRODUCCIÓN DE LA FÍSICA MODERNA, Y LA RELATIVIDAD, EN EL BACHILLERATO.**

La enseñanza de los aspectos más modernos de la física ha estado habitualmente relegada de los planes de estudio del bachillerato. En las últimas décadas se ha originado un movimiento de renovación entre cuyas razones (Osternan y Moreira, 2000) destacan la necesidad de:

- Despertar la curiosidad de los alumnos y ayudarlos a reconocer la física como una empresa humana, y por lo tanto cercana a ellos.

- Presentar la física del último siglo a los estudiantes de hoy, no detenerse en 1900.
- Usar la física moderna como motivación hacia las carreras científicas.
- Proporcionar claves científicas para la cultura de nuestro tiempo.

Cabe indagar acerca de las razones que hayan podido dar lugar a esta escasa presencia. Entre ellas se han barajado:

- a) Su dificultad intrínseca.
- b) Su carácter antintuitivo y lejano, con escasa utilidad práctica.

Sin embargo estas características pueden ser sometidas a críticas muy fundadas, en estos comienzos del siglo XXI:

Por un lado, su dificultad puede compararse sin desventaja con la física clásica. En efecto, multitud de estudios han revelado que tampoco esta es asimilada sin dificultades por los alumnos, y que errores conceptuales que se refieren a aspectos clave, y muy fundamentales, persisten largos años y a través de niveles de formación distintos. Por ello no cabe contraponer la física moderna a una supuesta física clásica más accesible.

En segundo lugar, el concepto de lo cotidiano y de lo verosímil evoluciona al ritmo en que lo hace la sociedad y los vínculos CTS. Por ejemplo, en nuestra sociedad los fenómenos eléctricos y electrónicos son omnipresentes, y temas tales como la estructuración del universo o la energía nuclear, forman parte de la vertiente científica, y pseudocientífica, de la divulgación o de la ficción.

Junto a estas razones cabe añadir los valores positivos que entraña su papel acerca de la formación de una visión moderna de la ciencia y su desarrollo, superando visiones deformadas de la misma.

Por último, entre las razones que pudieran motivar su escasa presencia, no es desdeñable el peso de la tradición en la enseñanza de la física. La incorporación de nuevos aspectos ha de acompañarse del adelgazamiento de otros y una difícil reponderación de su valor en la formación del bachiller, usando como guía para el ajuste su valor propedeútico hacia un abanico amplio de estudios posteriores. Todo ello dificultará la renovación de textos y programas, y la inclusión con un peso relevante de este tema en los currículos.

## **1.2 LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN EN LA COMUNIDAD DIDÁCTICA. PRINCIPALES PROBLEMAS Y DEFICIENCIAS EN EL APRENDIZAJE**

La enseñanza de la física moderna en el bachillerato, de la que la de la relatividad forma parte, aparecía ya claramente problemática a comienzos de los ochenta. En 1986 Gil, Senent y Solbes, (Gil et al. 1986) presentaron un amplio estudio acerca de la introducción de la física moderna en la secundaria

en nuestro país. Las hipótesis de partida, enunciaban: a) Que su enseñanza viene caracterizada por una introducción desestructurada que mezcla las concepciones clásicas y modernas y no muestra la existencia de una clara ruptura entre ambas: No deja clara la existencia de dificultades insuperables que originaron la crisis de la física clásica, y no diferencia entre ambas ni señala los límites de validez de la clásica. b) Hay presencia de abundantes errores conceptuales en textos c) Los alumnos no logran una mínima comprensión de los conceptos e ideas de la física moderna.

Estas hipótesis fueron confirmadas plenamente mediante un trabajo experimental que incluyó la revisión sistemática de 42 textos y cuestionarios a 347 alumnos. Obtuvieron valores superiores al 80% acerca de aspectos tan relevantes como el desconocimiento de la crisis de la física clásica o la escasa comprensión de conceptos tan básicos como el carácter límite de la velocidad de la luz.

Hagamos la salvedad que los planes de estudio de entonces, anteriores al sistema LOGSE, no incluían de forma relevante el estudio de la relatividad, pero sí los aspectos estudiados acerca del conjunto de la física moderna.

Los autores citados concluyeron propugnando una aproximación a la enseñanza de la física moderna que parta de la crisis de las concepciones clásicas, y muestre cualitativamente las características del nuevo paradigma.

En un trabajo de profundización posterior (Gil y Solbes 1993) complementan esta perspectiva: *“La física moderna fue construida contra el paradigma clásico, y su aprendizaje significativo demanda una aproximación similar”*, y concluyen proponiendo programas de actividades de orientación constructivista, que superen esa visión deformada de la ciencia y que produzcan en los alumnos cambios conceptuales similares a los cambios históricos de paradigma.

Esta orientación, de corte epistemológico, no es la única propuesta, Osternan y Moreira señalan la presencia de otra corriente (Osternan et al. 2000) que elude precisamente esta perspectiva y que considera que el uso de analogías clásicas dificulta la comprensión de la física moderna. Por último, una tercera vía, que centran en Arons, propone la introducción de aspectos singulares, muy seleccionados, y apoya la búsqueda en la física clásica de los prerequisites para su comprensión.

En cuanto a los resultados de las investigaciones, en lo que respecta al aprendizaje de los alumnos, se ha resaltado la disparidad entre los investigadores, y en una reciente revisión (Villani et Arruda 1998) se señala *“su carácter ambiguo e intrigante”*, pues para algunos autores en la enseñanza media (cita a Bartali et al 1979, Solbes 1986, Borghi et al 1993) o en los primeros cursos (por ejemplo Angotti 1978) se consigue con sus propuestas que *“en su primer contacto con la materia muestran gran interés”* y los resultados son esperanzadores, logrando un aprendizaje sin especial dificultad. Por el contrario en sus propios estudios (Arruda 1994) o en el importante

trabajo de Hewson (Hewson 1982), los resultados obtenidos muestran un aprendizaje escasamente significativo.

En cuanto a la estabilidad de las concepciones diferentes trabajos han mostrado que los estudiantes retienen muy poco de la teoría al cabo de pocos años (Gil y Solbes 1993) o, incluso en postgraduados se encuentran serias dificultades en la comprensión de lo esencial, (Villani y Pacca 1987).

Estas breves referencias apuntan claramente a la existencia de un problema didáctico, percibido como tal por la comunidad científica, y al que este trabajo intentará contribuir a clarificar.

### **1.3 EL DEBATE ACERCA DE LA MASA RELATIVISTA.**

El concepto de masa en el marco de la Teoría de la Relatividad ha suscitado un rico debate epistemológico y didáctico, que en algunas ocasiones, ha derivado hacia lo semántico. Entre las virtudes de la controversia está la clarificación conceptual y el incremento del consenso de la comunidad científica, más concretamente de los profesores, esto facilita el aprendizaje a los estudiantes y la transferencia de conceptos entre niveles, fuentes diversas...

En el tema de la masa ha sucedido algo normal en la historia de la física pero que suele ser bastante olvidado en la enseñanza de la misma: los conceptos se desarrollan, refinan y generalizan en el transcurso del tiempo, es decir, evolucionan. En un momento dado se producen consensos en torno a un determinado concepto (en nuestro caso la masa relativista), después hay discusiones y controversias hasta que se llega a un nuevo consenso; buena prueba de ello es que en revistas internacionales todavía aparecen, en número decreciente, artículos que utilizan  $m_r$ . Por ello, *The European Journal Physics* decidió en 1998 la publicación de un comentario "Note on the meaning and terminology of  $S^R$ " encargado a Lev Okun para atajar esta situación, (Okun 1998).

A grandes rasgos se contraponen el uso de la masa en reposo, como única masa, a la denominada masa relativista correspondiente a una partícula con masa en reposo  $m$  que se mueve con velocidad  $v$  y que se define como  $m_r = m/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ . También se puede definir como  $m_r = E/c^2$  siendo  $E$  la energía total de la partícula, es decir, la suma de la energía en reposo y de la cinética. Otra definición equivalente se realiza a través de la cantidad de movimiento relativista, dada por  $\mathbf{p} = m_r \mathbf{v}$ . Los dos usos difieren también de forma considerable en el tratamiento de los sistemas de partículas.

En este caso hay dos razones que propician el debate: en primer lugar, la posición del propio Einstein que ha dado lugar a controversia, (Adler 1987), Carson(1998) y que se examina posteriormente; en segundo lugar, la diferencia entre ambos puntos de vista, en el marco de la teoría especial de la relatividad, es de interpretación dado que, evidentemente, la expresión de las leyes es la misma. Donde unos autores utilizan el producto de  $\gamma$  por la masa en reposo

( $\gamma m$ ), otros emplean la masa relativista, con lo cual no se puede apelar a los resultados experimentales.

En la presentación de la Relatividad Especial que hacen la mayor parte de los libros de texto de secundaria, o primer curso universitario (Sawicki 1996), se encuentran ambas clases de masas: la relativista y la masa en reposo; la misma circunstancia se da en los libros de divulgación científica y en algunos artículos de investigación didáctica. El valor de afirmaciones sobre la masa, o sobre el comportamiento de cuerpos y sistemas, pueden ser muy diferentes, y esta diferencia de tratamiento es reflejo del debate sobre la introducción de las masas indicadas anteriormente.

En el tratamiento que hacen libros clásicos de nivel superior (Landau y Lifshitz 1973, Goldstein 1970, Jackson 1980) aparece exclusivamente la masa en reposo. Por el contrario, también, la masa relativista aparecía en textos tan importantes como el Feynman (1969) o el Alonso y Finn (1970) en los que han sido formadas algunas generaciones de físicos y químicos. En consecuencia, el profesorado en activo se encuentra más familiarizado con el enfoque que hace uso de la masa relativista.

Sin embargo, en términos generales, el consenso ha ido desplazándose hacia la posición que prescinde de la masa relativista; en ediciones recientes de algunos textos, por ejemplo Alonso y Finn (1995), Tipler (1992), Gettys, Koller y Skove (1992), ya se ha modificado esta postura. En ese sentido se ha realizado ya algún estudio preliminar sobre la presencia del concepto en el bachillerato (Sánchez 2000), apoyándose en Bauman (1992), en el que se detecta la presencia de  $m_r$  en algunos libros de texto del nuevo bachillerato.

### ***1.3.1 Argumentos que se han utilizado para defender el uso de la masa relativista.***

Los defensores de la utilización de la masa relativista argumentan que ésta permite la introducción de conceptos en relatividad especial de una forma que resulta de más fácil comprensión por parte de los alumnos (Sandin 1991). y que si cambiamos los conceptos newtonianos de espacio y tiempo para que las leyes de la mecánica sean invariantes bajo las nuevas transformaciones de Lorentz, parece lógico (especialmente para los estudiantes) que la masa newtoniana también varíe de la misma forma.

De esta manera, se puede explicar que sea necesaria una gran cantidad de energía para incrementar la velocidad de una partícula cuando su velocidad es próxima a la de la luz  $c$ , siendo infinita cuando  $v = c$ , de donde se deduce el carácter límite de la velocidad de la luz. La argumentación anterior considera la masa relativista como inercial. Por otra parte, para los defensores de  $m_r$  se debe considerar que el aumento indicado de la masa es completamente real porque los resultados de las medidas dependen del sistema de referencia elegido (Sandin 1991).

Los resultados experimentales de Kaufmann y Bucherer, realizados en 1901 y 1909 respectivamente, parecen mostrar que la inercia de una partícula cargada, entendida como relación entre la fuerza y la aceleración obtenida, aumenta con la velocidad. Si dicha partícula penetra en un campo magnético  $B$  y describe una circunferencia de radio  $R$ , se cumple que  $m_r = qRB/v$ . La velocidad  $v$  se puede deducir si la partícula se hace pasar por un campo eléctrico  $E$  y por uno magnético  $B$  que se ajustan para que  $qE$  sea igual a  $qvB$ . De esa forma se obtiene la expresión  $m_r = qRB^2/E$  que puede ser calculada porque todos los parámetros son conocidos. Estos valores experimentales se ajustan perfectamente a la relación  $m_r = m/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$  (Bikerstaff y Patsakos 1995).

Para los partidarios de la masa relativista, la expresión de la energía en reposo  $E_0 = mc^2$  es un caso particular de la más general  $E = m_r c^2$  en la que  $E$  es la energía total (energía en reposo más cinética) de una partícula libre y  $m_r$  su masa relativista (Sandin 1991). La última expresión indica la relación entre la energía y la masa siendo la constante  $c^2$  un factor de conversión para las unidades de energía y de masa. En consecuencia, consideran que los principios de conservación de la masa y de la energía, que aparecen como independientes en la física clásica, quedan unificados, de manera que la conservación de la energía de un sistema aislado implica la conservación de la masa y viceversa (Warren 1976, Bauman 1994). La aplicación de la ecuación  $E = m_r c^2$  a los fotones da como resultado que dichas partículas posean una masa  $m_r = E/c^2$  a pesar de que su masa en reposo sea nula. Si se admite que los fotones tienen masa, parecería que se puede explicar fácilmente por ejemplo la desviación de su trayectoria cuando se mueven en un campo gravitatorio (Sandin 1991).

### 1.3.2 Argumentos que muestran las limitaciones de la masa relativista.

Los críticos de la masa relativista opinan que en el estudio de la relatividad especial se debe hacer uso de una masa, la masa en reposo, dado que este concepto es un invariante relativista, es decir que su valor no depende del sistema de referencia elegido (matemáticamente es el escalar invariante en las transformaciones de ejes asociado al tetravector energía impulso  $E^2 - \mathbf{p}^2 c^2 = m^2 c^4$ ) y que caracteriza a la partícula o sistema unívocamente y que el concepto de masa relativista no es necesario y puede producir errores conceptuales en los estudiantes. Uno de los más frecuentes es asignar un carácter inercial a la misma. Sin entrar en el problema de las definiciones, que ha sido revisado recientemente (Doménech 1998), por inercial se entiende, al igual que en la mecánica newtoniana, el factor de proporcionalidad entre la fuerza aplicada a un cuerpo y la aceleración adquirida.

El error que se apunta es el de inducir al estudiante a generalizar la expresión:  $m_r = m/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$

en  $p = m_r v$  ; correcta

- y  $F = m_r a$  ; incorrecta  
 o  $E_c = \frac{1}{2} m_r v^2$  ; incorrecta

La consideración de la masa relativista como masa inercial aparece, de manera implícita, en expresiones del siguiente tipo: “cuando aumenta la velocidad de un cuerpo, su masa también aumenta” (Giancoli 1985, Alonso y Finn 1970, Feynman 1969, Peña y García 1996, Candel *et al.* 1989) o en la justificación de la velocidad de la luz en el vacío como un valor límite (Giancoli 1985, Peña y García 1996). En este último caso, se parte de la definición de masa relativista y se indica que dicha masa aumenta a medida que lo va haciendo la velocidad, de manera que su valor sería infinito cuando la velocidad coincidiera con la de la luz. Al razonar de las formas que se acaban de señalar, se está considerando que la masa relativista ofrece una resistencia a la aceleración. Sin embargo, esta afirmación no es correcta dado que la masa relativista aparece en la definición de cantidad de movimiento relativista pero no resulta ser el coeficiente que relaciona la fuerza y la aceleración.

A este razonamiento los defensores de la  $m_r$  responden restringiéndose a el uso de  $F=dp/dt$ , perdiendo, eso sí, el eventual carácter de transferencia desde la mecánica clásica de  $m$  por  $m_r$ . De hecho, esta supuesta facilidad de paso de la expresión clásica a la relativista es no sólo falaz, sino didácticamente muy negativa al inducir a los estudiantes a que lleguen a conclusiones falsas. La expresión de cantidad de movimiento en relatividad especial ( $\mathbf{p} = m_r \mathbf{v}$ ) puede obtenerse a partir de la utilizada en la mecánica clásica ( $\mathbf{p} = m \mathbf{v}$ ) por medio de la sustitución de la masa newtoniana ( $m$ ) por la relativista ( $m_r$ ). De acuerdo con lo anterior, los estudiantes pueden pensar, de manera equivocada, que la energía cinética relativista se deduce aplicando la sustitución indicada  $E_c = m_r v^2/2$  o que la fuerza viene dada por  $\mathbf{F} = m_r \mathbf{a}$  pero dichas expresiones, como se sabe, son incorrectas (Sandin 1991, Tipler 1985).

De acuerdo con los detractores de la masa relativista los resultados de los experimentos de Kaufmann y Bucherer antes mencionados cabe interpretarlos de muy diversa forma, en coherencia con el espíritu de la teoría: los valores del radio de curvatura de una partícula cargada que se mueve en un campo magnético cuando varía la velocidad cumplen que la cantidad de movimiento de la partícula es  $p = RqB$  siendo  $R$  el radio de curvatura de la trayectoria,  $q$  la carga eléctrica y  $B$  el campo magnético basta introducir la definición de  $p = mv/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ , y  $m$  es una constante, los resultados obtenidos experimentales se pueden interpretar a través de la dependencia del factor  $(1 - v^2/c^2)^{-1/2}$  con la velocidad (Bickerstaff y Pastakos 1995) sin tener que considerar supuestas variaciones de la masa relativista con la velocidad.

En relación con lo anterior, los detractores de la masa relativista también indican que el gran aumento de energía necesario para incrementar la velocidad de una partícula cuando su velocidad es próxima a la de la luz puede interpretarse considerando la relación entre la energía total ( $E$ ) de la partícula y la velocidad, dada por  $E = \gamma mc^2$  (Adler 1987). De esta forma tampoco es necesario considerar que la masa aumenta con la velocidad.

En cuanto al movimiento longitudinal es un hecho conocido que el tiempo, que debe actuar una fuerza aplicada a una partícula para conseguir un determinado incremento de velocidad es mayor a medida que aumenta la velocidad de la partícula. Para explicar este fenómeno no hace falta considerar que la masa de la partícula se incrementa cuando lo hace la velocidad. En un sistema de referencia que se moviera con la partícula, los intervalos de tiempo indicados serían iguales. Sin embargo, un observador situado en un sistema de referencia diferente al anterior, mediría unos periodos de tiempo que aumentan con la velocidad de acuerdo con el factor  $(1 - v^2/c^2)^{-1/2}$  (Adler 1987).

La perspectiva correcta *no es la que centra la atención en lo que le ocurre a la partícula sino en las modificaciones en la estructura del espacio y el tiempo*. Por ejemplo si consideramos el comportamiento de una partícula bajo la acción de una fuerza en la dirección de su movimiento, en un sistema de referencia en que esté en reposo, podemos aproximar su comportamiento ante una fuerza por:  $\Delta x_0 = \frac{1}{2} a_0 \Delta t_0^2$  En nuestro sistema:  $\Delta x = \frac{1}{2} a \Delta t^2$ . Las transformaciones entre sistema resultan ser:  $\Delta x = \Delta x_0 / \gamma$  y  $\Delta t = \gamma \Delta t_0$  relacionando resulta  $a_0 = \gamma^3$  visto anteriormente para una fuerza paralela, cumpliéndose las transformaciones de Lorentz aplicada a la fuerza. Por tanto una transformación puramente cinemática basada en las propiedades del espacio tiempo brinda una explicación completa, manejando la masa invariante (French 1991).

Esta crítica es poderosa por cuanto va hacia lo esencial del planteamiento relativista en cuanto a proceso espacio-temporal, y abre paso a los supuestos de la Teoría General en la cual la topología del espacio es protagonista, por ejemplo no cabe hablar de efectos gravitacionales sobre la luz sin considerar geodesias y carecería de sentido atribuir masa a un fotón.

Otro aspecto contemplado en el debate se refiere a la relación entre la masa y la energía. Los detractores de la masa relativista sólo admiten dicha relación cuando se refiere a la energía y a la masa en reposo, de acuerdo con la ecuación  $E_0 = mc^2$  (Okun 1989). La masa en reposo de una partícula permanece constante en cualquier sistema de referencia pero el valor de la energía depende del sistema elegido. Por tanto, si la relación entre la masa y la energía es cierta en un sistema de referencia, no se puede cumplir en otros (Hannibal 1991). El sistema de referencia en el que se verifica dicha relación es, precisamente, aquel en el que la partícula se encuentra en reposo (Whitaker 1976). Este es el sentido del invariante:  $E^2 - (pc)^2 = (mc^2)^2$  donde para  $p = 0$ ,  $E_0 = mc^2$ . Todos estos razonamientos se extienden de forma natural para el manejo de los sistemas..

En textos que desarrollan la relatividad especial por medio de la formulación tetravectorial se señala que los usos de la masa relativista *“ocultan la covarianza de la formulación y oscurecen más que aclaran el aspecto físico de la situación”* (Goldstein 1970).

En conclusión, el uso de la masa invariante supone una opción coherente, que se asume como consecuencia de la crítica a la masa relativista efectuada en la sección anterior, y en los términos que se acaba de plantear.

#### 1.4 EL DEBATE ACERCA DE LA UTILIZACIÓN DE LA HISTORIA DE LA CIENCIA Y LA RELATIVIDAD.

Es objeto de debate la conveniencia de la utilización de la historia de la física en la enseñanza, y la extensión de este uso, en una doble vertiente: Como objeto de estudio *per se* y como referente didáctico para la evolución conceptual en la formación física del estudiante.

En la primera perspectiva se considera como un contenido curricular – conceptual, procedimental y actitudinal-, en la creencia de su valor cultural y formativo, en la profundización de los mecanismos de creación de conocimiento físico y su papel en la sociedad y en interacción con la ciencia y la técnica.

En la segunda se considera que favorece una adecuada comprensión de los conceptos físicos. Por un lado diversos autores han investigado acerca de los paralelismos existentes entre las diferentes metafísicas, ideas, conceptos, teorías etc. mantenidos a lo largo de su evolución y las ideas de los alumnos. (Mattews 1994). Con lo que su comprensión por parte del docente y su uso, parcial, encauzado y dirigido con los estudiantes proporciona una poderosa herramienta didáctica. También se ha mantenido de forma argumentada su papel metacognitivo. (Campanario 2000)

Con relación al primer aspecto, es preciso destacar que el campo de estudio de la historia de la física no es el de la propia física. Su uso en la enseñanza debe matizarse. Siguiendo a Sánchez Ron (1988) acerca de la utilidad de su papel en la comprensión de la propia ciencia:

*“Sobre este punto auténticamente crucial, diré de entrada que no está demostrado en absoluto y que, además, en mi opinión, es tomado en general y sin más falso”*. El mismo autor aboga más adelante con rotundidad por el uso controlado, simplificado y dirigido, en línea con las propuestas de descubrimiento dirigido.

En suma, pese, o gracias a, el debate parece interesante, en la perspectiva que suscribimos, de la propuesta constructivista del aprendizaje, el uso controlado y dirigido de la Hª de la Física. Más específicamente, la cercanía de nuestra posición a la propuesta que considera a los estudiantes como investigadores noveles bajo la dirección de un experto (Gil 1993) precisa *“ Una traducción de la información “* con un hilo conductor claro, que evite dispersiones no significativas y la desorientación del alumno.

En el caso que nos ocupa, la enseñanza de la relatividad, todos estos argumentos cobran una mayor relevancia por las especiales características de la materia de estudio.

- a) Por el estatus del tema en el armazón lógica de la disciplina: se manejan conceptos primarios como espacio, tiempo, simultaneidad, masa, etc. Estos conceptos se han presentado al alumno o, posiblemente, se ha esquivado la reflexión acerca de los mismos, en la fundamentación y desarrollo de los

diversas áreas de estudio: mecánica clásica, Teoría de campos, óptica, mecánica cuántica etc. Estos conceptos poseen una rica tradición de controversia histórica muy ilustrativa y paralela a concepciones de los propios alumnos. ¿Qué concepción del espacio tiene un alumno, que considera que un cuerpo más allá de la atmósfera no pesa?.

- b) Por razones epistemológicas: La génesis de la teoría de la relatividad se presenta como una ocasión de cambio profundo, de modificación del paradigma físico. Permite profundizar en los límites de validez del conocimiento científico y en el carácter lineal o no de la acumulación del conocimiento.
- c) Por la riqueza de las conexiones socio-culturales y tecnológicas.

Que este tipo de razonamientos han estado, más o menos explícitos, en todos los estudiosos de la enseñanza, lo denota la presencia tradicional de la faceta histórica en los manuales de la disciplina. A menudo desde orientaciones epistemológicas muy criticables, ya superadas. Un argumento adicional de fácil constatación es la persistente referencia al debate histórico en las publicaciones sobre la didáctica de la relatividad. E incluso al significado físico de los conceptos. (ver el apartado anterior acerca del debate sobre el concepto de masa relativista)

En suma, todas estas razones inducen a prestar atención y revisar el proceso histórico lo que se efectuará posteriormente.

### **1.5 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA:**

A la luz de lo expuesto podemos formular el problema planteado en la forma siguiente:

**1.-¿Cómo se introduce en la enseñanza usual (ESO, Bachillerato) la relatividad y sus prerequisites tanto desde el punto de vista científico cómo didáctico?**

**2.-¿Son comprendidos estos conceptos por los alumnos? ¿Qué dificultades encuentran? ¿Qué consecuencias plantea dicha forma de enseñanza?**

En el capítulo siguiente se formulará la hipótesis que orientará el trabajo y se marcará la línea de investigación que se seguirá para resolver este problema.



## **2 FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS, FUNDAMENTACIÓN**

En el capítulo anterior se ha centrado el problema de la enseñanza de los fundamentos de la teoría especial de la relatividad, y se ha puesto de manifiesto el interés de su estudio. Se pasa a formular en este una hipótesis, y se argumenta sobre sus fundamentos.

### **2.1 FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS**

Los conceptos de tiempo, espacio y sus propiedades, así como los distintos sistemas de referencia, se introducen ya desde los niveles inferiores de la secundaria de forma desestructurada, acrítica y poco reflexiva. La enseñanza de la Teoría de la Relatividad se realiza de forma poco clarificadora, sin tener en cuenta las preconcepciones de los alumnos, y sin resaltar su posición en la estructura de la Física. En consecuencia, el aprendizaje es escasamente significativo y no se consolidan las nuevas concepciones en los estudiantes.

### **2.2 FUNDAMENTACIÓN DE LA HIPÓTESIS**

Con objeto de fundamentar la hipótesis enunciada, se efectuará un análisis acerca de la forma en que se lleva a cabo la enseñanza de la física en la secundaria y especialmente la física moderna. Se indagará acerca de la forma en que se presentan los puntos esenciales de la relatividad y las aportaciones de la investigación didáctica al respecto. Se comenzará trazando las líneas esenciales del marco teórico que enmarca este trabajo.

#### **2.2.1 REFLEXIÓN GENERAL SOBRE EL MARCO TEÓRICO DE LA DIDÁCTICA EN QUE SE SITÚA LA INVESTIGACIÓN.**

En los últimos veinte años hemos asistido a un espectacular despliegue de la base teórica de la didáctica de las ciencias, que se recoge en un mayor número de revistas y órganos de expresión, y que configuran un cuerpo teórico organizado en torno a un consenso básico: la orientación constructivista.

Toda esta atención parte de constatar que el proceso de enseñanza-aprendizaje dista de ser un proceso simple. A continuación se recogen los rasgos más importantes que de la enseñanza de la física, y más específicamente de la física moderna, nos ha dibujado la investigación didáctica; punto de partida que ha de orientar este trabajo.

### 2.2.1.1 La enseñanza tradicional de la Física.

La investigación didáctica en los últimos treinta años ha venido a trazar una manera de hacer en las clases de física que, a grandes rasgos, sigue lo que se ha venido llamar *el pensamiento docente de sentido común y que se basa en un alto grado en la transmisión verbal*. Este cuadro no es uniforme, hay iniciativas notables y una labor de difusión e impregnación que poco a poco lo va modificando.

Sin embargo esté cuadro general está muy vigente, todavía hoy. Una formación didáctica escasa del profesorado y una visión reduccionista de la ciencia han contribuido a este panorama (Gil 1994), (Furió 1994). En la práctica docente habitual resulta frecuente comprobar la existencia de estudiantes capaces de responder correctamente cuestiones tradicionales presentadas en los exámenes y que, sorprendentemente, muestran una falta de comprensión muy profunda de conceptos científicos básicos. Este aspecto de la enseñanza fue objeto de una investigación sistemática que comenzó en la segunda mitad de la década de los setenta (Viennot 1976). Dicha investigación puso de manifiesto la existencia de los llamados “errores conceptuales” o “ideas alternativas” de los alumnos así como sus características. Por una parte se comprobó que eran comunes, es decir, mostraban una sorprendente similitud entre estudiantes de diferentes países y sistemas educativos. En segundo lugar estas ideas persistían pese a la enseñanza (McDermott 1984).

El estudio de los errores conceptuales ha dado lugar a una amplia bibliografía. Se han catalogado ideas alternativas en muchos campos de la física y de la química, especialmente en mecánica. Se pueden citar al respecto las recopilaciones realizadas por Hierrezuelo y Montero (1989), y por Driver, Guesne y Tiberghien (1992)

Algunos autores (Gil et al. 1991) han señalado la enseñanza por transmisión verbal como una de las causas del mantenimiento de los errores conceptuales. Este tipo de enseñanza considera que el aprendizaje se realiza por la recepción que hace el alumno de los conocimientos transmitidos por el profesor. A dicha explicación se le atribuye las características ideales de claridad, coherencia, precisión y exactitud por parte del profesor. La comprensión de los conceptos se completa con la realización de problemas numéricos, cuestiones y prácticas de laboratorio. El papel del estudiante en este proceso es el de receptor, que añade los conocimientos a los que ya posee. Si el aprendizaje no se produce, la causa se encuentra en el escaso interés del estudiante o en su inteligencia limitada (Novack 1982, Gil 1983).

De acuerdo con los planteamientos anteriores, se puede concluir que la enseñanza por transmisión verbal no tiene en cuenta los conocimientos previos de los alumnos ni las dificultades que dichos conocimientos puedan representar en el proceso de aprendizaje de nuevos conceptos. Este problema se agrava si se toma en consideración los errores que se introducen por la vía de los propios libros de texto (Carrascosa 1987). Por otra parte, la enseñanza

tradicional presenta los conceptos sin considerar los problemas que llevaron a su construcción, Otero (1985).

La resolución de problemas se aborda por la enseñanza tradicional como una actividad cuasialgorítmica, de solución conocida por lo que no cabe realizar tentativas (Gil y Martínez Torregrosa 1987). Se caracterizan por la falta de reflexión cualitativa previa, o, dicho de otro modo, el operativismo mecánico con que se abordan habitualmente los problemas, y por un tratamiento superficial que no se detiene en la clarificación de los conceptos, y que poco favorece una auténtica comprensión. Como consecuencia, los alumnos reducen la resolución de problemas a la utilización mecánica de fórmulas o de procedimientos memorizado. De esta forma, cualquier variación en los modelos de problema ocasiona en los estudiantes la renuncia a su solución.

Las prácticas de laboratorio las considera una ilustración de conceptos o mera comprobación de leyes (Payá 1991). Normalmente se desarrollan a través de un guión en el que se proporcionan detalladamente instrucciones sobre el objetivo, montaje experimental, recogida de datos y análisis de los resultados.

Todo este esquema de enseñanza transmite a los estudiantes una idea errónea del trabajo científico, no se da al estudiante la oportunidad de llevarlo a cabo, En cuanto a sus ideas y preconcepciones no se produce su sustitución porque no se contempla que emitan hipótesis, extraigan conclusiones, confronten sus ideas...

Por último la enseñanza tradicional no presenta los cambios de conceptos, modelos y teorías que se han producido en la ciencia (Solbes 1986) ni las relaciones de esta con la sociedad (Solbes y Vilches 1992). Los efectos sobre los estudiantes se manifiestan por un desinterés hacia la física y una actitud negativa hacia la ciencia.

Para concluir en cuanto a los materiales didácticos utilizados, numerosas investigaciones, por ejemplo (Gil y Carrascosa 1991), (Solbes y Tarín 2000) han señalado sus insuficiencias: la presencia de errores conceptuales, carencia de actividades que salgan al paso de preconcepciones detectadas, falta de atención al proceso histórico de construcción de conocimientos, etc.

### **2.2.1.2 Aportaciones clave de la investigación didáctica. Marco Teórico.**

La intensa actividad investigadora desarrollada a partir de los años setenta incentivada por el movimiento de aprendizaje por descubrimiento, justamente criticado por su inductivismo, fue impulsada por aportaciones tan importantes como las de Ausubel y Novack con sus propuestas de aprendizaje significativo (Ausubel 1978), Novack (1982). Y desarrollada siguiendo la importante vía acerca de las preconcepciones, el concepto de cambio conceptual, aprendizaje por investigación guiada, etc. Todas estas investigaciones han contribuido a sentar las bases de lo que Hodson en 1992 señalaba: *“Hoy ya es posible construir un cuerpo de conocimientos en el que se integren*

*coherentemente los distintos aspectos de la enseñanza/aprendizaje de las ciencias”.*

Este cuerpo de conocimientos aparece como un cuadro coherente al que confluyen y consolidan las distintas iniciativas y conduce a las nuevas propuestas de estrategias metodológicas, que coinciden básicamente en *concebir el aprendizaje de las ciencias como una construcción de conocimientos que parte necesariamente de un conocimiento previo.*

Los pilares básicos de este cuerpo de conocimientos, punto de partida de la didáctica hay que buscarlos en lo que sabemos del alumno y el profesor así como de la ciencia: Estructura psicológica de los alumnos, los esquemas conceptuales de los alumnos, su nivel de destrezas, la propia disciplina científica con sus planos lógico y epistemológico, el profesorado, sus conocimientos, expectativas, formación, ideas sobre la ciencia, etc.

Se puede hacer referencia, pues, a un modelo constructivista de las ciencias, cuyas principales características Driver (1986) resume así:

- *Lo que hay en el cerebro del que va a aprender tiene importancia.*
- *Encontrar sentido supone establecer relaciones: los conocimientos que pueden conservarse permanentemente en la memoria no son hechos aislados, sino aquellos muy estructurados y que se relacionan de múltiples formas.*
- *Quien aprende construye activamente significados*
- *Los estudiantes son responsables de su propio aprendizaje.*

Particular influencia ha tenido la propuesta de considerar el aprendizaje como un proceso de *cambio conceptual* (Posner, Strike, Hewson y Gertzog, 1982), fundamentada en la epistemología constructivista y en un cierto paralelismo entre el desarrollo conceptual de un individuo y la evolución histórica de los conocimientos científicos (Piaget, 1971; Gil, 1983).

Según esto, el aprendizaje significativo de las ciencias constituye una actividad racional semejante a la investigación científica, y sus resultados - el cambio conceptual- pueden contemplarse en ciertas áreas como equivalentes - siguiendo la terminología de Kuhn - a un cambio de paradigma.

A partir de las ideas de Toulmin (1972), Kuhn (1975) y muchos otros, sobre filosofía de la ciencia, Posner identifica condiciones para que tenga lugar el cambio conceptual:

- *Es preciso que se establezca insatisfacción con los conceptos existentes.*
- *Ha de existir una concepción mínimamente inteligible que:*

- Debe llegar a ser plausible, aunque inicialmente contradiga a las ideas previas del alumno y
- Ha de ser potencialmente fructífera, dando explicación a las anomalías encontradas y abriendo nuevas áreas de investigación.

Pese a todo lo anterior, algunos autores han señalado que los cambios conceptuales que parece exigir el aprendizaje de las ciencias no resultan fáciles de lograr, incluso cuando se toman en consideración los preconceptos (Driver, 1986a).

Según otros investigadores (Gil, 1983; Gil y Carrascosa, 1985a), esta dificultad en cambiar las estructuras conceptuales de los alumnos puede ser entendida a partir de los estudios de Piaget (1970) sobre epistemología genética que sugieren una vinculación *entre la evolución histórica de la ciencia y la formación de las concepciones intuitivas en los niños*.

Se comprende así la necesidad de realizar un esfuerzo por aproximar la *trabajo científico a las clases*, de hecho las dificultades encontradas para producir los cambios conceptuales, pueden ser debidas a que la enseñanza de las ciencias no está organizada para familiarizar a los alumnos con dicha metodología y favorecer así el necesario cambio metodológico.

Hay que resaltar debidamente la *importancia de las ideas previas* de los alumnos para la construcción de *significado* en una situación. Partir de las concepciones previas de los alumnos supone que ellos mismos tomen conciencia de ellas, lo que sólo es posible si se les ofrece la oportunidad de hacerlas explícitas, de expresar sus expectativas, es decir, si se les implica en actividades de aprendizaje abiertas tales como invención de conceptos, emisión de hipótesis, interpretación física de magnitudes, estudio del campo de validez de leyes y relaciones... Es necesario, por tanto, estructurar el proceso de enseñanza-aprendizaje en la clase para fomentar el uso de estas formas de pensamiento divergente.

Respecto a los *trabajos prácticos*, sus carencias han sido reiteradamente expuestas en la abundante literatura (Payá, 1991) y se ha constatado igualmente *la escasa familiarización de los alumnos con aspectos básicos de la metodología científica* (Gil y Payá, 1988). De este modo, la indudable capacidad motivadora que los trabajos prácticos tienen, *a priori*, para alumnos y profesores, se convierte en decepción después de realizar algunos. Una propuesta acorde con la visión constructivista estriba en dejar de concebir las prácticas como mera ilustración de los conocimientos transmitidos por el profesor o el texto y darles el mismo estatus de *tratamiento de problemas* que tuvieron en el proceso histórico de construcción de dichos conocimientos (Gil, 1982). Se superaría así la distinción clásica entre teoría, prácticas experimentales y resolución de problemas, como se muestra por ejemplo por Gil y Valdés (1995).

De esta manera, un trabajo práctico comenzaría con el planteamiento de un problema y estaría estructurado en actividades que familiarizasen a los alumnos con una correcta utilización de la metodología científica, sin reducirla a la manipulación e interpretación posterior de los resultados, y favoreciesen, al propio tiempo, una adquisición significativa de conocimientos. *Se trata de presentar a los alumnos la situación problemática de partida que da sentido a la investigación*, la consideración de su posible interés, seguida del análisis cualitativo inicial de la situación y la precisión del problema, la emisión y operativización de hipótesis, la elaboración de estrategias para comprobar la hipótesis formulada, la planificación y realización de experimentos, el análisis y comunicación de resultados, seguida de una recapitulación final, tal como ilustran por ejemplo Gil y Valdés (1996), ofrecen la posibilidad de entroncar las prácticas de laboratorio, de una forma natural y coherente con la labor científica, en el proceso de enseñanza-aprendizaje.

En cuanto a la resolución de problemas ha surgido una línea de renovación didáctica cuya propuesta supone un *modelo de resolución de problemas como investigación* (Gil y Martínez Torregrosa, 1983). Según este modelo, un problema es una situación para la que no se tiene respuesta elaborada de modo que debe abordarse con actitud investigadora.

Nuevos factores han aparecido o se han revalorizado en los últimos años: Los factores axiológicos sobre valores y actitudes (Briscoe 1991), (Solbes 1999). Las relaciones C.T.S. que asocian la construcción de conocimientos a problemas de interés para los alumnos (Gil et al 1991), (Catalán et al 1986), (Solbes et al 1989), (Solbes y Vilches 1999), actitudes de profesores y alumnos (Yager y Pennick 1986), clima del aula (Welch 1985, Rivas 1986, Gil 1993).

En cuanto a la evaluación ha de integrarse coherentemente en el modelo una *evaluación inicial, la formativa y finalmente la sumativa* y en consonancia con la indicación metodológica de *partir de la situación del alumno*, sus concepciones previas y potenciales. Se impone una evaluación inicial y en cada fase para sentar las condiciones del punto de partida y la realidad del joven.

Según las ideas expuestas, *todo planteamiento metodológico basado en que el alumno aprenda significativamente debe vincularse a una práctica de evaluación formativa*, implicada en el proceso mismo del aprendizaje, capaz de favorecer que el alumno reciba la ayuda necesaria en el momento mismo en que le sea precisa. Las actividades didácticas en las que es posible identificar y valorar las ideas previas, observar no sólo resultados sino también los procesos de elaboración de los aprendizajes e intervenir en ellos, identificar las necesidades de los alumnos y valorar los progresos de estos con relación a sí mismos, resultan particularmente adecuadas para este fin.

Finalmente la evaluación sumativa es imprescindible, para revisar el logro de los objetivos y también para implicar a los propios alumnos, desde la consideración de que el esfuerzo se intensifica en la seguridad de que será

finalmente evaluado. Por tanto esta evaluación sumativa final de cada fase del proceso y globalizadora final es esencial para orientar la actividad.

Por último, desde una perspectiva integradora del papel del profesor y de los recursos didácticos en el proceso de enseñanza-aprendizaje, es *necesario integrar la evaluación de los procesos, los recursos, los aspectos organizativos del centro y el papel del profesor* en el proceso, como retroalimentación imprescindible para la mejora del trabajo y superación profesional del profesor.

Este planteamiento general acerca de lo que la investigación didáctica ha detectado sobre la práctica habitual en los centros educativos, y el modelo alternativo que ofrece desde el consenso constructivista, justifica la verosimilitud de la hipótesis emitida acerca de la enseñanza de la Teoría de la Relatividad en el bachillerato. Orientará la operativización de la misma y sugerirá, en una segunda fase de este estudio, las líneas y requisitos de una propuesta alternativa.

### **2.2.2 FUNDAMENTACIÓN DIDÁCTICA DE LA HIPÓTESIS**

En este apartado se revisará las aportaciones de la investigación didáctica a la enseñanza-aprendizaje de la relatividad.

Una parte sustancial de los estudios han girado en torno a las estrategias de cambio conceptual. Utilizado incluso con carácter ejemplificador para contrastar modelos. (Hewson 1982. Alemañ 2000), que esto sea así no debe extrañar en tanto la teoría de la relatividad supone una formulación nueva de los conceptos clásicos de espacio y tiempo. Son concepciones muy potentes, que están profundamente arraigadas en la mente y la psicología humana, tanto que, incluso, fueron considerados como categorías preexistentes, conceptos *a priori* de la mente humana, sirva de ejemplo los razonamientos de Kant acerca de la verdad de la geometría euclídea. Esta orientación ha sido apoyada, sin duda, por su papel en la historia de la física.

Al reseñar estos trabajos hay quien prefiere el uso del término de evolución conceptual (Toulmin 1972). Lo verdaderamente sustancial es que el cambio conceptual es en realidad una modificación de las concepciones donde aparecen superpuestos sustratos, campos de uso y que la idea es resaltar las limitaciones y el campo de validez de una para favorecer el tránsito a la nueva. La consolidación y asentamiento de las nuevas concepciones las dotará de mayor capacidad explicativa y su mayor uso provocará el paulatino abandono de las viejas concepciones.

En la perspectiva de utilizar el concepto de cambio conceptual, los diversos trabajos usan como concepción de partida la concepción clásica y como la de llegada la visión relativista que emerge de la relatividad especial. Todos los esfuerzos en los niveles anteriores se han dirigido a consolidar esta estructura, y lo que se está solicitando ahora al estudiante es la superación de la misma. La tarea no es sencilla, numerosos trabajos han mostrado la presencia de potentes obstáculos en la construcción y consolidación del mundo newtoniano,

es difícil modificar los esquemas espontáneos. ¿Qué decir ahora de la nueva etapa? si reflexionamos acerca de la modificación de un paradigma científico, podemos seguir a Colombo y otros (1995) *A pesar de estas limitaciones, en contraposición con los sistemas conceptuales de sentido común (poco estructurados, con pobre interrelación y gran incoherencia), un sistema científico tiene una estructura mucho más consolidada, con fuertes interconexiones, de gran validez y consistencia*

*¿ No cabría esperar, entonces, que, desde un punto de vista cognoscitivo, un paradigma científico sea aún más difícil de modificar que los espontáneos?*

En el caso de la relatividad tal y como resaltan Toledo y otros (1997): *“Los alumnos se encuentran ante una situación nueva frente a la física clásica y no pueden acudir a experiencias cotidianas para aceptar la plausibilidad de la teoría o para corroborar la eficiencia de la misma”*. En el transcurso de su trabajo muestran que tras una instrucción formal:

- 1) *Que los nuevos conceptos de la relatividad espacial no han desplazado a los anteriores de la física clásica, sino que se han unido a ellos en una interacción compleja.*
- 2) *El aprendizaje de contenidos específicos es más bien superficial, sin anclajes firmes que permitan resolver situaciones fuera de aquellas desarrolladas en la instrucción formal.*

Conclusiones análogas encontramos en otros autores (Villani et al 1998, Alemañ 2000), que incluso renuncian explícitamente a considerar que se ha dado un autentico cambio

Un problema adicional de relevancia es la persistencia y estabilidad de las concepciones relativista, que como se ha mostrado es muy baja (Gil y Solbes 1993) (Villani y Pacca 1997), de tal forma, que estudiantes que incluso mostraron un conocimiento aplicado de los principios, situados al cabo de un tiempo ante análisis simples, recurran a nociones que involucran conceptos de espacio y tiempos absolutos.

Villani (1987) ha mostrado como incluso estudiantes avanzados usan nociones espontáneas en la solución de problemas acerca de la velocidad de la luz, incluso próximas a nociones espontáneas señaladas en el campo de la cinemática por otros autores.

A continuación se repasan algunos aspectos problemáticos, pero vaya por delante la salvedad de que en este campo de la relatividad y, en general de la física moderna, las ideas espontáneas o intuitivas, que involucran un mayor grado de formalismo matemático y complejidad no han sido cabalmente estudiadas. Los estudios son fragmentarios y no disponemos de las recopilaciones de campos más tradicionales.

### 2.2.2.1 Ideas acerca de los conceptos de espacio y tiempo.

*En palabras de Mach, citado por Williams (1968) "... precisamente los principios mecánicos de apariencia más simple son de un carácter sumamente complicado;...". La investigación acerca de estos conceptos, así como la de los de sistema de referencia, principio de relatividad de Galileo, la introducción de la vinculación masa inercial y gravitatoria, etc. adquiere una importancia primordial para nuestros propósitos, son el punto de partida de la introducción de la Teoría de la Relatividad. Desde una perspectiva didáctica, un estudio de la evolución de las teorías físicas puede realizarse bajo el análisis de los cambios experimentados en las concepciones del espacio y tiempo... la revisión de sus propiedades debe considerarse núcleo básico en la presentación, no solo de la física relativista sino también de la mecánica newtoniana ( Doménech 1985).*

Es interesante plantear, por tanto, si se ha efectuado o no una introducción reflexiva, matizada y rica de estos conceptos, no sólo por su interés intrínseco. Es de esperar que los modelos y apreciaciones de los alumnos hayan evolucionado desde una explicación de los fenómenos limitada por la percepción y basada en el sentido común hacia una visión más abstracta y próxima al modelo newtoniano. La clave desde la perspectiva de la transición hacia la cosmovisión relativista es si se han tenido en cuenta, o no, en la enseñanza-aprendizaje que va posibilitando esta evolución conceptual, el desarrollo de conectores que faciliten el cambio. Y si se han incluido en los contenidos, con la relevancia que requieren estos aspectos

Esto no parece habitual, muchos autores renuncian explícitamente a ello. Valga como ejemplo un reputado texto, *Evolución de los conceptos de la física (Arons 1970)* en donde se lee: *"No hemos hecho intentos para presentar espacio y tiempo como entidades. Hemos especificado como mediríamos intervalos espaciales y temporales por medio de la comparación de ellos con normas arbitrarias tales como metros o segundos, pero esto es muy diferente a formular aseveraciones acerca de lo que el espacio es y lo que el tiempo es... Nuestro enfoque total para la definición es uno que se define como operacional ...".* Como se deduce en su parte final, al menos el autor precisa la omisión, e implícitamente remite a posteriores reflexiones.

Desde una perspectiva didáctica se han estudiado aspectos parciales del problema. En el estudio de distancias podemos encontrar diversos marcos de explicación en los alumnos: El marco relativista, el galileano el cual admite la invarianza de las distancias instantáneas en la transformación de distancias entre los sistemas de referencia, o *"una visión espontánea que considera a las distancias en ellas mismas independientes de los observadores"* (Villani 1987).

En cuanto a la visión de los estudiantes acerca del espacio y sus propiedades sería una simplificación burda suponer que las concepciones que mantienen son iguales a la que se ha acuñado como tradicional visión newtoniana. En efecto, los atributos de esta visión tales como continuidad, homogeneidad, isotropía etc., distan mucho de ser asumidos por los alumnos,

El concepto de continuo en su aspecto geométrico-matemático ha sido estudiado por Romero, C. (1996) concluyendo que *“desde el punto de vista didáctico la hipótesis de intuitividad inmediata del continuo no tiene base que la sostenga” e insiste “ en el caso de los alumnos de nuestra muestra el esquema conceptual del continuo es un agregado inconexo de imágenes”*.

El concepto de isotropía tampoco reviste la sencillez que se le podría presuponer, Investigaciones llevadas a cabo sobre el concepto como propiedad de los materiales, con alumnos de primer ciclo universitario muestra la deficiente asimilación del mismo Gallegos J.A (1992).

Por otra parte la explicación de los fenómenos relativistas remite hacia una visión mecanicista del mundo, el estudiante no razona en términos de propiedades del espacio-tiempo sino que su metafísica requiere de propiedades fijas, de cuerpos extensos para una visión realista de la naturaleza. Como expone Hewson (1982) esto remite al problema de la percepción: Lo que *parece*” y lo que es. El estudiante admite apariencias pero mantiene interiorizada una realidad, y en consecuencia, las explicaciones han de darse en términos mecánicos.

Esta tendencia le hace buscar mecanismos para explicar efectos tales como la contracción de Lorentz, la falta de simetría en la situación privilegiando a un observador etc.

### **2.2.2.2 Acerca del principio de relatividad.**

Ya desde los niveles inferiores interiorizar el principio de relatividad muestra graves dificultades: *...” El problema de la relatividad del movimiento es muy difícil para estos alumnos [ 4º de ESO] Analizar el movimiento desde un sistema de referencia exterior a uno mismo. Es algo que se consigue sólo en un estado de desarrollo mental avanzado y con bastante entrenamiento”* . (Hierrezuelo 1993).

Villani (1987) Ha mostrado como incluso en estudiantes avanzados de universidad, en la respuesta a cuestiones que involucran la propagación de la luz y a varios observadores, surge la idea de movimiento absoluto y nociones que parecen moverse entre un plano de lo real y un plano “ aparente”. Concluye afirmando que *no es realista partir de la base de que los alumnos poseen un completo conocimiento del principio clásico de relatividad de Galileo* y propugna que en la introducción a la relatividad el trabajo de construir la intuición relativista pase primero por la construcción de la intuición galileana que libere a los estudiantes del espacio absoluto

### **2.2.2.3 Acerca del marco de referencia.**

Galili y Kaplan (1997) han revisado la presentación que se realiza en textos de Física general de los SRI y del uso de distintos marcos de referencia, e indican: *“ Cuando se introducen las leyes de Newton, sería natural aplicar la relatividad y usar diversos marcos de referencia, pocos libros lo hacen”*. E

incluso en la conservación de la cantidad de movimiento o la energía, no se usa a menudo más que un observador

En mecánica la introducción de SRI está asociada a la primera ley de Newton. Dicha ley no cabe introducirla como caso particular de la 2ª, en tanto que su contenido físico está asociado a la definición del Sistema de Referencia, so pena que se quiera utilizar el concepto de Sistema de Referencia Absoluto. Muy a menudo se cae en un razonamiento circular. Este es el significado profundo de la 1ª ley *“Y no seguir este tratamiento en la escuela impide la comprensión de los alumnos.”*, de hecho este estudio y la mención a este *“principio de relatividad Galileo-Newton, ayuda a una fácil transición a la relatividad einsteniana”*. (Parasnis 1998)

En cuanto a las concepciones de los alumnos respecto a los marcos de referencia newtonianos Saltiel (1980) indica:

- a) La velocidad, la distancia atravesada en un movimiento, y la trayectoria de un objeto en movimiento son vistas como independientes del marco de referencia.
- b) El movimiento es explicado descriptivamente con relación a un espacio absoluto. En este esquema hay una sola velocidad verdadera y verdadero espacio atravesado, y las diferencias en las medidas obtenidas por varios observadores en movimiento son causadas por movimientos aparentes
- c) En situaciones de movimiento “arrastrados” se usa la idea de adición de movimientos absolutos en vez de las transformaciones de velocidades en el movimiento relativo. Velocidad y distancias reales son vistas como adiciones de velocidades propias.

Consecuencia directa de esto es la presencia de sistemas de referencia privilegiados que perciben los valores “reales”. La valoración de lo que es real, o no, está siempre presente. Los estudiantes admiten que diversos observadores “parecen” que obtienen diversas medidas pero en “realidad” hay solo una medida del espacio, del tiempo o la velocidad de la luz. Estas ideas son recogidas por muchos autores (Hewson 1982), (Villani 1987).

Una adecuada comprensión del concepto de marco de referencia junto con las ideas relativistas conducen a la noción de invarianza, concepto fundamental. *“Los principios de invarianza a menudo dan la clave del funcionamiento del mundo natural, señalan que relación particular no un accidente de un observador situado en una posición preferente si no es un efecto de una profunda simetría subyacente del universo”* (Resnick, Halliday, Krame, Física 1992)

#### **2.2.2.4 Acerca de la velocidad de la luz**

En otro trabajo con estudiantes universitarios Arruda (citado en Villani y Arruda 1998) ha puesto de manifiesto una gran resistencia a la aceptación de

los principios de la teoría, en concreto los estudiantes aceptan la velocidad última de la luz (en un supuesto espacio absoluto implícito) y la composición galileana de velocidades pero con la limitación de que el resultado no exceda de  $c$ .

Por otra parte la insistencia en la constancia de la velocidad de la luz recogida en el segundo postulado de la relatividad ha de insistir y clarificar que hace referencia al movimiento en el vacío y con relación al problema de su determinación en distintos sistemas, evitando así el error de suponer que eso se extiende a su paso por medios materiales, error frecuente en los alumnos. En todo caso cabe indicar que la velocidad por cualquier medio material en reposo o movimiento (problema del arrastre parcial de Fizeau) es inferior a  $c$ .

En términos generales no parece que en el aprendizaje de la cinemática o la óptica se aborde, aunque sea tangencialmente el problema de la medición de la velocidad de la luz, y su relevancia lógica y epistemológica.

### 2.2.2.5 Ideas acerca de la masa.

Las ideas manejadas por los estudiantes acerca de la masa son diversas y con distintos planos de utilidad según el campo de uso: Masa como cantidad de materia, principio de conservación de la masa (asimilado más de forma teórica que operativa a veces por el hincapié que se realiza desde la química elemental), masa variable con la velocidad, inducido por ideas difusas tales como ciencia ficción, desintegración y desaparición de masa en procesos nucleares...

Parasnis (1998), pone de manifiesto las dificultades que acarrea la utilización de conceptos y definiciones de masa como cantidad de materia de un cuerpo. Esto “conjura la imagen de átomos de un cuerpo” Lo que dificulta la comprensión de “la variación de la masa con la velocidad” einsteniana. Sin asumir esta última parte, al rechazar la noción de masa relativista, no cabe ligar la masa a la cantidad de materia concepto escasamente definido, además de incapacitar para asumir el concepto de masa de un sistema no material por ejemplo con fotones alejándose.

Ya se ha indicado el criterio de masa a proponer a los estudiantes: la llamada masa invariante como única masa tanto para una partícula como para construir la magnitud masa del sistema, pero insistiendo de nuevo, y saliendo al paso a un error muy corriente entre los estudiantes, se puede ilustrar ciertas dificultades de comprensión derivados del uso de la  $m_r$  por los estudiantes: el uso inercial de la masa en la expresión de la segunda ley de Newton. En efecto, incluso para aquellos defensores del uso de la masa relativista,  $m_r$ , si se parte de la expresión en la forma  $\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt$  y se sustituye en ella la cantidad de movimiento relativista dada por  $\mathbf{p} = m_r \mathbf{v}$ , se llega a que  $\mathbf{F} = m_r \mathbf{a} + \mathbf{v} \, d m_r / dt$ . Esta relación se transforma en  $\mathbf{F} = m_r \mathbf{a}$  sólo cuando la masa es constante. Por tanto, la medida de la inercia en relatividad no puede venir dada por  $|\mathbf{F}|/|\mathbf{a}|$  puesto que la masa  $m_r$  varía con la velocidad (Sandin 1991).

De la ecuación anterior podemos deducir dos casos particulares en los que históricamente se manejaban dos masas inerciales de valores diferentes, según la fuerza actuase en dirección paralela o perpendicular a la velocidad. Si la fuerza que actúa sobre una partícula es perpendicular a su velocidad, se cumple que  $F_t = m_t a$ , donde  $m_t$  representa la *masa relativista transversal*, definida por  $m_t = \gamma m$ . De manera análoga, cuando la fuerza que actúa sobre un cuerpo es paralela a su velocidad, se tiene que  $F_l = m_l a$ , siendo  $m_l$  la *masa relativista longitudinal* cuyo valor es  $m_l = m\gamma^3$ .

Los conceptos de masa longitudinal y transversal son prerelativistas, y en su momento se usaban para describir la diferencia de comportamiento experimental de las partículas. Estos dos conceptos no se suelen utilizar hoy en día, aunque todavía aparecen en algunos textos (Alonso y Finn 1970). Si bien no se usan hoy como tales nos sirven para ilustrar como no se puede extender abusivamente la llamada masa relativista  $m_r$  a razonamientos de aumento de la masa con la velocidad, pues no satisface ni siquiera la ecuación que describe el proceso.

Ya se ha tomado posición acerca de la masa relativista pero recalquemos aquí una de las principales críticas: *“Hay un elemento importante en la utilización de la masa relativista, en que centra los fenómenos en la partícula y no en las propiedades intrínsecas del espacio-tiempo”* (Withaker 1976).

En cuanto a las nociones, erróneas, de desaparición y aparición de masa en las reacciones nucleares, su extensión e incidencia ha sido puesta de manifiesto en múltiples trabajos (Warren, 1976, Solbes 1986, Gil, Senent y Solbes 1986, Tarín 2000...).

El error suele derivarse de la confusión entre la suma de las masas de las partículas que componen el sistema ( $\Sigma m_i$ ), y la masa del sistema ( $M$ ). Y corrientemente surge cuando no se identifica el sistema ni se hace un seguimiento de la evolución del mismo, o no se define correctamente la masa del sistema (invariante relativista). Es claro que  $(\Sigma m_i)$  puede cambiar, de hecho lo hace corrientemente en física de partículas, o en procesos nucleares, y sin embargo  $M$  permanecer constante.

### 2.2.2.6 Acerca de la energía.

El concepto de energía es uno de los más importantes unificadores y fructíferos de la Física, y es de uso común en la tecnología, la cultura y la sociedad, pero por otra parte resulta ser uno de los más complejos en cuanto a las dificultades que entraña su enseñanza y el aprendizaje por los estudiantes. Dada su importancia la energía ha sido estudiada in-extenso desde la didáctica, aunque el grueso de las investigaciones se han dirigido a los niveles inferiores y no son comunes los trabajos sobre alumnos en el rango de los 17-18 años.

Duit (1981,1984) ha sintetizado los cinco aspectos clave del concepto, que deberían atenderse desde la didáctica: La propia noción, la transformación, transferencia, conservación y degradación de la energía.

La teoría de la relatividad completa el cuadro conceptual de la noción de energía trazado a lo largo de toda la enseñanza secundaria mediante la introducción de la equivalencia masa energía presentando un esquema nuevo:

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$$

que introduce la energía en reposo:  $E = mc^2$  y una nueva perspectiva para los fotones. Es imprescindible para estudiar elementos de física de partículas, el efecto Compton, la creación de pares y la física nuclear en que se ponen en juego las diversas facetas.

La primera dificultad didáctica surge con la propia introducción del concepto: si se realiza deductivamente a partir del teorema de las fuerzas vivas y la utilización de la cantidad de movimiento relativista o se centra en la presentación del mismo y su novedad. Driver y Warrington (1985) han señalado en un trabajo sobre jóvenes de hasta 18 años las dificultades que encuentran en diferenciar trabajo y energía, así como las deficiencias que presentan en el manejo de la energía asociada a los sistemas.

El uso amplio de los sistemas da paso a los problemas de constitución, es decir: cual es el origen de la energía, y a que se asocia, a la interacción, conservación etc.. Solomon (1985) ha detectado el mal uso realizado por los estudiantes acerca del origen de la energía en los sistemas y su transferencia.

En el campo de la relatividad especial se prescinde de la complejidad de las energías potenciales, salvo en los aspectos de energía de enlace en los átomos o sistemas complejos, sin embargo, el concepto de sistema de referencia inercial es muy importante y como señalan Gil, Furió y Carrascosa (1994), en el ámbito de la transformación de Galileo, se detecta en los alumnos dificultades en el manejo de una energía cinética relativa, en conformidad a la velocidad relativa según el sistema de referencia, lo que es de traslación inmediata al campo de la Teoría de la Relatividad.

Para conocer cual es el estado actual de la práctica educativa podemos recurrir a un amplio estudio recientemente realizadas por Solbes y Tarín (2000) en el ámbito de la Comunidad Valenciana y asumir las investigaciones que concluyen de forma rotunda, tras un estudio de campo: *“La equivalencia masa energía tal y como aparece en la teoría especial de la relatividad no es comprendida por los alumnos. Para algunos de ellos la materia desaparece y se transforma en energía.... Otros piensan que la energía se encuentra almacenada en la materia y aparece en algunos procesos..”*

### 2.2.2.7 Dificultades sobre el manejo de relaciones funcionales y el estatus de las constantes en física

Ha sido puesto de manifiesto la dificultad que representa para los alumnos manejar constantes y relaciones funcionales que involucren dependencias de más de una variable al mismo tiempo. Por ejemplo Maurines (1992) maneja una relación del tipo  $L=V.T$  en la propagación de ondas mecánicas en una cuerda, obteniendo conclusiones de interés para nuestro campo de estudio. En efecto, indica:

- “Tendencia a privilegiar el contenido numérico de una relación en detrimento del contenido conceptual.... Hay que comparar esta tendencia a la “numerización” de las relaciones con la que apunta Viennot (L’implicite en physique: les étudiants et les constantes) sobre las constantes: para los estudiantes esta palabra remite más a la idea de número que a la función constante de varias variables”.
- Señala también la elevada dificultad que representa para los estudiantes manejar relaciones funcionales en que varíen simultáneamente más de una variable. Incluso en contextos de física superior.
- Apoyándose en los trabajos previos de otros autores recalca la importancia de asumir la relación funcional en términos de no dependencia. Es decir de los factores que la relación muestra que no depende.
- Por último arguye: “ parece que piensen [los autores de manuales que basta decir a los estudiantes que la velocidad de propagación de una señal es constante para que lo entiendan y lo asimilen.

La pertinencia de estas consideraciones a nuestro problema es evidente por un lado indican la necesidad de reforzar el estatus de la constancia de la velocidad de la luz en el vacío, recalcando su carácter invariante, su universalidad, y su relevancia entre el puñado de constantes fundamentales de la física. En esta línea otros autores como Colombo de Cudmani (1995) insisten en la dificultad de discriminar entre las ctes. físicas universales y los valores ctes. que representan propiedades específicas de un elemento o sustancia, o que pueden ser controlados por el experimentador.

El hecho de elevar la constancia de la velocidad de la luz a la categoría de 2º postulado en el desarrollo de la Teoría Especial de la relatividad no salva el problema en tanto no se acompañe, lo que no suele ser habitual, con un adecuado tratamiento epistemológico acerca de la jerarquía de las leyes, axiomas, teoremas.....

### 2.2.3 FUNDAMENTACIÓN HISTÓRICA

Diversos autores han profundizado en la búsqueda de vinculaciones y paralelismos en el proceso histórico del nacimiento y aceptación de las teorías

poniéndolas en conexión con el proceso de cambio conceptual de los alumnos y la didáctica de la materia. ( Driver et al 1992, Saltiel y Viennot 1985)

A continuación se examina en el marco particular de la Historia de la Ciencia, la evolución histórica, y los atributos, de los conceptos de espacio y tiempo, así como del principio de relatividad. se efectuará trazando, a grandes rasgos, las etapas fundamentales de los grandes sistemas de pensamiento:

### 2.2.3.1 Las concepciones anteriores a la revolución científica.

Fue la civilización griega la primera que dio el paso a la creación consciente de sistemas de pensamiento que presentaban una visión general del mundo, la naturaleza, el hombre, la vida y el propio pensamiento. Ellos fueron los primeros en indagar sistemáticamente y crear conceptos claves para nuestro tema: continuidad- discontinuidad, materia y su estructura, el infinito, la simetría e interrogarse sobre los fundamentos del tiempo, las propiedades de los cuerpos o la configuración del mundo y sus límites. Esta concepción del universo dotado de regularidades, leyes asequibles al descubrimiento por el pensamiento humano, es el germen de la ciencia y constituye una de sus más importantes aportaciones.

La geometría euclídea, fuente de todo el razonamiento geométrico hasta el S.XIX, uno de sus más importantes frutos, describe con gran precisión de forma *aproximada* el mundo. La ruptura con ella no se produjo de manera efectiva en la Física hasta la Teoría General de la Relatividad del S.XX. Los *Elementos* fueron publicados alrededor del 300 aC y han constituido uno de los textos más influyentes de la ciencia

En la tradición occidental las concepciones helénicas, que dominaron el pensamiento antiguo, se revitalizaron y difundieron en la baja edad media. Podemos fijar dos corrientes principales, asignándoselas a Platón y Aristóteles, y que suponen visiones diferentes acerca del mundo físico.

Según el *Timeo* de Platón, los cuatro elementos de los que se construían todas las cosas del universo estaban compuestos de invisibles partículas muy pequeñas. Las de cada elemento tenían una forma geométrica característica y cada elemento eran transformable en otro destruyendo la respectiva forma geométrica y adoptando la del otro.

Desarrollando esta línea marcada por el *Timeo*, las escuelas medievales del norte de Francia, ej. Thierry de Chartres (muerto hacia 1050) reflexionaban acerca del espacio y se pronunciaban por la inexistencia de vacío, consideraban el espacio como un *plenum*, esto es que estaba lleno, lo que a su vez les planteaba el problema del movimiento por ellos: *El movimiento podía darse desplazando un cuerpo a su vecino y ocupando su lugar en una especie de torbellino* (Crombie 1959).

La explicación Aristotélica, en cambio, no aceptaba la teoría platónica de que las formas de las cosas físicas existían separadas de ellas, ni atribuía el

cambio por la aspiración de las cosas a sus arquetipos ideales. No veía ninguna razón para que no hubiera límite en la división de los cuerpos físicos, el espacio, tiempo o de cualquier *continuum*, Para él la concepción del vacío, representaba el *no ser*, frente al ser de la materia y por tanto aparecía como insostenible. Introducía entre el ser y no-ser la potenciabilidad y asignaba el cambio a la actualización de la misma por una causa. El lugar natural de las sustancias marcaba la tendencia natural de cambio, conforme a un esquema cosmológico.

El cosmos aristotélico, era una amplia esfera, pero finita, con su centro en la tierra. Y con un sistema de esferas, envolturas concéntricas donde se ubicaban de forma natural los elementos y limitada por la esfera de las estrellas fijas. Los cuerpos orientaban cada uno sus movimientos hacia el lugar natural que les correspondía en razón de su composición, y existía una diferencia cualitativa entre los movimientos de un cuerpo determinado según las diversas direcciones. El movimiento de las esferas se realizaba respecto a un punto fijo, el centro de la Tierra en cuanto centro del universo

La fuente original del movimiento era, junto con las esferas celestes el *primum movens*, que se movía a sí mismo; el movimiento circular uniforme era la máxima aspiración de un cuerpo físico a ese estado.

La concepción del espacio que se deriva de esta cosmología es la de un espacio limitado, finito, no isótropo, con simetría esférica, etc..

En cuanto al tiempo, la posición aristotélica se corresponde con la que podemos atribuir al “sentido común” en cuanto a tiempo orgánico, progresivo, irreversible de carácter universal y absoluto. Sin embargo, en cuanto a la construcción conceptual podemos reflejar cierta perplejidad en la concepción antigua, baste el ejemplo de San Agustín (S.V) que se interroga “¿Qué es, pues, el tiempo? Si nadie me lo pregunta, lo sé; si deseo explicarlo a quien me lo pregunta, no lo sé”. (citado por Bertrand Russell en *El conocimiento humano* 1983) Muestra las dificultades de construir un tiempo abstracto.

Los relojes antiguos estaban basados en fenómenos astronómicos o en desplazamiento de fluidos o granos y no fue hasta finales del siglo XIII en que se inventó el reloj mecánico, en él las manecillas traducían el tiempo a unidades de espacio sobre la esfera, con ello se iniciaba el camino hacia un tiempo abstracto, matemático, de unidades sobre una escala, que pertenecía al mundo de la ciencia.

También el espacio sufrió la abstracción durante la edad media, de los mapas simbólicos y jerárquicos, en cuadros se pasó a la perspectiva y en los mapas cartográficos a la posición en sistemas abstractos de coordenadas de latitud y longitud.

Santo Tomás de Aquino ( 1225-1274) fijó la imagen del mundo cristiano en términos muy próximos a los aristotélicos , soslayando, reinterpretando y

ajustando a *Las Escrituras* las obras antiguas que se iban incorporando al acervo occidental.

La crítica escolástica a Aristóteles, socavó gran parte de sus supuestos lógicos. En el S XIV, Nicolás de Oresme, criticó el principio de la unicidad de la tierra, la existencia de un centro único natural del espacio. *Según la teoría Oresmiana, el movimiento natural de un cuerpo se halla gobernado, no por la posición que ocupa en un espacio aristotélico absoluto, sino por su posición relativa a otros fragmentos de materia.* (Kuhn ,1978). Mas adelante Kuhn lo cita en la siguiente forma que anticipa claramente los argumentos copernicanos basados en la relatividad óptica.

*Parto del supuesto de que el movimiento local sólo puede ser percibido cuando un cuerpo altera su posición respecto a otro. Por tal razón, un hombre situado sobre un navío a que se mueva con uniformidad, rápida o lentamente, y que tan sólo puede ver otro navío b que se mueva del mismo modo que a ... Si a está en reposo y b en movimiento, creerá que b se mueve; pero si es a quien está en movimiento, seguirá creyendo, como en el caso anterior, que a está en reposo y b es el que se mueve....*

Oresme termina argumentando sólidamente la posibilidad de movimiento de la Tierra. Kuhn en el texto citado contrasta la diferencia con Copérnico y Galileo señalando el salto de estos de un *podría moverse*, planteado como especulación académica a un “ se mueve” realmente (De Kuhn 1978), lo que trastoca la concepción antigua del espacio centrada en la tierra.

### **2.2.3.2 La revolución científica y la posición newtoniana.**

Tras el inicio de la revolución copernicana, que podemos situar hacia en 1543 con la publicación de su *De revolutionibus* y los pasos de hombres como Galileo se abrió el camino hacia la superación de las concepciones antiguas. Entre las figuras clave con relación a nuestro tema destaca el papel de Descartes (1596,1649).

La aportación de Descartes a la construcción del concepto físico de espacio es muy importante. Para los griegos existían los cuerpos, los entes matemáticos o físicos, y su posición o relación entre ellos, pero no la noción de espacio como tal, el espacio asume tan sólo un papel cualitativo, con la matematización cartesiana del espacio se convierte en sujeto del pensamiento físico.

*..[La] Ciencia ha sido capaz de avanzar sin disponer del concepto de espacio como tal: fueron suficientes para sus necesidades las formas corpóreas ideales...Por otra parte, el espacio como conjunto, tal como fuera concebido por Descartes constituía una necesidad absoluta para la física newtoniana.* (Einstein 1986)

Decartes identifica espacio y materia y prescinde del concepto de fuerza, la acción de un cuerpo sobre otro se realiza por contacto en un mar de materia e

identifica materia y extensión. Prescinde por tanto del concepto de vacío y reduce la causalidad física a la conservación del movimiento. Todo el movimiento aparece por tanto como relativo. Leibniz desarrolló estas ideas, introdujo las fuerzas para explicar la impenetrabilidad de la materia y las distribuciones de fuerzas, estableciendo una corriente de pensamiento alimentada por los Bernouilli, Euler, Kant ...

Bunge (1983) resume las diversas concepciones del espacio y tiempo considerando tres modelos: Modelo de materia prima, modelo relacional y modelo de recipiente. El modelo cartesiano considera la materia como vórtices, puntos especiales del espacio, esta línea de pensamiento dará frutos conceptuales en la teoría de campos de Faraday y en el siglo XX.

El modelo relacional en el que podemos encuadrar a Leibnitz atribuye los conceptos de espacio y tiempo a las relaciones y ordenaciones de las posiciones relativas entre objetos y sucesos. En esta línea se sitúan parte de las críticas de Mach, a finales del XIX sobre los presupuestos básicos newtonianos.

La concepción de Newton es prototípica del modelo recipiente. Según eso el mundo está constituido por corpúsculos sólidos, extensos y espacio vacío. Sin embargo se maneja una tercera entidad, la fuerza, cada partícula es capaz de actuar "a distancia" y ejercer fuerzas directamente sobre otros cuerpos del universo. El universo newtoniano es infinito, ilimitado

La ecuación fundamental de la mecánica hace intervenir los conceptos de espacio, tiempo, sistema de referencia, fuerza, masa. La ley de la inercia precisa de un significado claro de términos como movimiento uniforme, reposo, movimiento en línea recta. Remite al problema del sistema de referencia con respecto al cual los cuerpos estén en línea recta recorriendo en tiempos iguales espacios iguales y por tanto plantean el problema de lo que sean el espacio y el tiempo. En el corolario quinto a los axiomas o leyes del movimiento. Se recoge la relatividad cinemática:

Al espacio se le atribuyen las propiedades de: homogeneidad (todos los puntos presentan las mismas propiedades geométricas), isotropía (todas las direcciones son equivalentes), universalidad (desde cualquier sistema de referencia se maneja una misma métrica), el tiempo aparece como continuo, homogéneo, universal (el tiempo transcurre igual en cualquier sistema de referencia, o sea los relojes una vez sincronizados marcan siempre el mismo tiempo) etc. En el esolío de los *Principia* (1687) es especialmente claro:

*I.- El tiempo absoluto, verdadero y matemático, en sí mismo y por su propia naturaleza, fluye de una manera ecuable y sin relación alguna con nada externo.....*

*II.- El espacio absoluto, por su propia naturaleza y sin relación alguna con nada externo, permanece siempre similar e inmóvil.....*

( tomado de William, P. 1968)

La presentación axiomática del espacio y el tiempo esconde los problemas lógicos, que pondrán de manifiesto más adelante, de forma clara, Mach, Poincaré y finalmente Einstein al razonar sobre las operaciones que los hacen operativos en la física. Los problemas se dan en la introducción de un tiempo objetivo local, el concepto de reloj y la generalización a todo el espacio del tiempo objetivo. La posición recogida de los enunciados de Newton, que no la de su práctica como físico le hacen señalar a Holton (1979): *"Hoy en día, afirmaciones como estas, sin ningún significado operacional inherente, se las llama, a veces sin significado, un término quizá algo drástico pero preciso en este sentido limitado"*.

Newton introduce un SRI como un miembro del conjunto de sistemas que se mueve con MRU respecto a un SR. absoluto. La vinculación con el principio de inercia es inmediato en tanto que un cuerpo en reposo permanece siempre en reposo o en MRU. Esta afirmación supone una progresión sobre la posición de Galileo, no solo en lo formal, pues la inercia por la que abogaba Galileo se seguía la forma circular en torno a la Tierra.

*Los movimientos relativos de cuerpos incluidos en un determinado espacio son los mismos, tanto en el caso de que ese espacio esté en reposo como en el caso de que se mueva uniformemente o en línea recta, sin movimiento circular. (Newton, 1972)*

Por último, el principio de relatividad, ligado al concepto de SRI permite la construcción coherente de la mecánica. Y refleja el hecho de que desde el punto de vista mecánico la traslación uniforme, como un todo, del conjunto del sistema material es indistinguible del movimiento absoluto.

Al igual que la ley de la inversa del cuadrado, la verosimilitud de la ley de la inercia y las centralizada de las fuerzas se basa en el carácter homogéneo e isótropo del espacio, y la caracterización del movimiento y reposo como clases de "estados".

El propio Newton era más consciente que sus sucesores de las dificultades inherentes al concepto de espacio absoluto, entidad que sin aparecer empíricamente en las leyes mecánicas referidas a partículas y masas juega un papel importante en la teoría. Así como de las dificultades lógicas de la "acción a distancia". Entre las cartas a uno de sus alumnos podemos encontrar este famoso fragmento, ( tomado de Berkson 1985)

*La idea de que la gravedad es innata, inherente y esencial a la materia, de forma que un cuerpo puede actuar sobre otro a distancia sin que medie nada que transporte sus acciones y sus fuerzas, me parece tan absurdo, que nadie que posea en asuntos filosóficos una facultad competente de pensar puede caer en ella.....*

### 2.2.3.3 Las aportaciones del barroco.

Lo fructífero en su desarrollo práctico del programa newtoniano, fue dando lugar a una habituación de los físicos a sus sistema de pensamiento obviando sus inconsistencias lógicas. Podemos decir que sus seguidores eran menos conscientes de sus dificultades que el propio Newton.

A lo largo del XVIII fue clarificándose, extendiéndose y formalizándose el edificio conceptual de la mecánica. Un trabajo, a menudo minusvalorado, muy bien estudiado por C.Truesdell, a quien podemos leer

*“ Hoy en día el “ principio de invarianza de Galileo” es bien conocido, pero durante el S XVIII se presenta más como una intuición que como una afirmación explícita. El descubrimiento de las propiedades de invarianza de la mecánica nació del estudio de problemas concretos más que de formulaciones generales”* Atribuye a los trabajos de Daniel Bernouilli, Euler y Clairaut hacia 1740 su formulación, y afirma: *“En 1745 Clairault expuso con gran claridad lo que hoy conocemos como el principio del movimiento relativo, según el cual un cuerpo observado desde un sistema de referencia no Inercial experimenta una fuerza “aparente “ que es igual a la aceleración cambiada de signo....”* (Truesdell )1975):

En esta tarea Euler es el primero en usar del lenguaje algebraico y diferencial para presentar la mecánica y a él se debe por ejemplo la formulación matemática de la segunda ley en forma analítica moderna, corrientemente atribuida a Newton. Euler, muy influido por Leibnitz, no deja de mostrar, no obstante, una versión ortodoxa de lo que constituía las nociones de espacio y tiempo. Así se muestra en sus célebre *Reflexiones sobre el espacio la fuerza y la materia*.

El éxito del modelo newtoniano lo impuso tanto como programa de investigación como sustrato básico de los desarrollos de otras ramas. Una importante línea de trabajo buscó la extensión de la cosmovisión Newtoniana a otros ámbitos, partículas materiales y fluidos diversos junto al ascenso del atomismo que será un tema básico del XIX.

La filosofía de Kant (1724-1804), y sus continuadores, terminará dominando el final de este periodo y gran parte del XIX. Consideraba al espacio y al tiempo no tanto como realidades físicas sino como “categorías” de la mente humana, que esta utilizaba para la ordenación del mundo. En ese sentido los atributos clásicos del espacio, con su naturaleza euclídea, y el tiempo se consideran las únicas concepciones naturales evidentes.

La investigación matemática desarrollaría el proximo siglo las geometrías no euclídeas, pero en sus creadores alentaba el espíritu de la creación teórica sin vinculación con la realidad física.

### 2.2.3.4 Los programas de investigación del XIX.

Dos grandes programas, con visiones muy diferentes de la naturaleza física orientaron el desarrollo de la física en este siglo. Uno era la continuación clara en el mundo de la electricidad y el magnetismo del programa newtoniano. El otro, impulsado por Faraday, y continuado principalmente por Maxwell, introdujo y desarrolló el concepto de campo. Las ideas de Faraday se alejaban de una forma muy clara del programa newtoniano y modificaban tanto la naturaleza del espacio físico como la propia concepción de materia. Maxwell sin embargo no dejó de tomar como referente las relaciones de hipotéticas masas en interacción y mantuvo una distinción nítida entre materia y espacio. Finalmente el propio Maxwell asumió como fundamental la propia estructura de las ecuaciones de campo y a éste como la entidad esencial. Se produce así un desplazamiento de la realidad física desde las partículas materiales hacia campos continuos expresados como ecuaciones en derivadas parciales. Tal y como se recoge en su *A Treatise on Electricity and Magnetism publicado en 1873*.

Los seguidores del esquema newtoniano trabajaron arduamente en su extensión a la electricidad y el magnetismo. Realizaron importantes aportaciones en la estructuración matemática de las leyes, aunque en el camino tuvieron que alterar supuestos importantes tales como la inclusión de acciones no centrales etc. Sin embargo la quiebra del concepto de acción a distancia derivada de la existencia de un tiempo de propagación de las perturbaciones supuso un importantísimo punto de contradicción con la cosmovisión newtoniana.

Por otra parte, el desarrollo de la óptica había refundado esta sobre la base de ondas transversales que precisaban de un medio de propagación: el éter. Conforme a las nuevas necesidades del desarrollo del electromagnetismo se intentó interpretar el campo como un estado tensional mecánico del éter.

La introducción de este concepto está ligado a la existencia de una concepción del espacio como recipiente de los fenómenos físicos e independiente de ellos. La incapacidad de asignar al espacio mismo una función activa obligó a la introducción de un sustrato material: el éter, capaz de vibrar y soportar la propagación de los campos.

Esta dualidad sintética de campos y partículas, como realidades físicas últimas, no ha sido resuelta hoy en la física, los intentos del propio Einstein en su programa de geometrización y unificación profunda se saldaron finalmente con un fracaso, pese a ello, esa tendencia hacia lo fundamental y hacia la unidad se encuentra hoy presente en la física más especulativa.

El poco éxito de los modelos mecánicos del éter dio paso a un uso meramente funcional. Con Hertz, hacia 1885 aparece la idea de un éter desvinculado a cualquier referente mecánico.

El problema del estado dinámico del éter se situaba en el centro de la explicación de los fenómenos ópticos: De la aberración estelar (la Tierra no

arrastra el éter Young 1804), El coeficiente de arrastre parcial de Fizeau para los medios en movimiento (1851). O los experimentos de detección del movimiento de la tierra en el éter, experimentos de Michelson 1881, y con Morley 1886).

Por otra parte la crítica de los fundamentos de la mecánica, realizada entre otros por Mach, puso de manifiesto las dificultades inherentes al concepto de espacio absoluto, alcanzó gran impacto su célebre su crítica al experimento crucial de Newton del cubo giratorio en que apoyaba la detección experimental del mismo. El rechazo a este absoluto conduce, en palabras de Einstein (1986): *Si se considera el movimiento desde un punto de vista descriptivo y no desde un punto de vista causal, sólo existe como movimiento relativo de las cosas, las unas con respecto a las otras. Pero la aceleración que aparece en las ecuaciones de Newton es incomprendible si se parte del concepto de movimiento relativo. Esto obligó a Newton a inventar un espacio físico con relación al cual parece que existe la aceleración.*

Para Mach no existía realidad sin posibilidad de definición operativa. Por ello los conceptos absolutos newtonianos eran pura imaginación. Escribía:

*“Todas” las masas, “todas” las velocidades, y por tanto “todas” las fuerzas son relativas. Con nuestros sentidos no podemos distinguir ninguna diferencia entre lo relativo y lo absoluto. Por otra parte no hay razón alguna para que admitamos dicha distinción, pues no trae ninguna ventaja, ni teórica ni de otro tipo.* (Citado por Selleri 1997). A continuación rebate el famoso experimento del cubo de Newton. Las ideas de Mach adquieren fortaleza si se reflexiona sobre el hecho de que la construcción real de la física no precisó de la detección del espacio absoluto y que las relaciones que se manejan son relaciones funcionales entre magnitudes, Mach otorgaba relevancia precisamente a las magnitud primaria que causaban “sensaciones”.

Las ideas de Mach resultaron finalmente demasiado limitadas para la Física, le conducían a cuestionar la noción de átomo, y finalmente a oponerse a la relatividad general. Sin embargo sus ideas y su crítica a los fundamentos de la mecánica sirvió de acicate, sin duda, a la formulación de la Teoría de la Relatividad de Einstein.

### **2.2.3.5 Las aportaciones de Poincaré y Lorentz**

Lorentz modifica sustancialmente el conceptos de éter, le libera de cualquier referencia mecánica y afirma la participación de la materia en los fenómenos electromagnéticos mediante la existencia de partículas elementales cargadas. El trabajo de Lorentz da al campo y a las partículas eléctricas el estatus de elementos de la realidad física.

Lorentz elaboró diferentes versiones en su reelaboración de la electrodinámica. Para explicar experimento de Michelson Morley en 1892 proponía la hipótesis ad-hoc de la contracción de los cuerpos en movimiento por la alteración de las fuerzas intermoleculares originada por la influencia del

movimiento en el seno del éter. De forma independiente a la anterior de Fitzgerald de 1889. Esencial a todas las versiones de la teoría era la existencia de un éter inmóvil que conducía a la incompatibilidad de fondo con las leyes newtonianas. Sin embargo también la introducción de las partículas eléctricas impedía la construcción de un modelo de realidad basado exclusivamente en campos.

En 1900 *Poincaré señala que si la Teoría de Lorentz es correcta habría que abandonar probablemente algunos principios de la mecánica newtoniana. Y advierte que la teoría del electrón no sólo viola el principio de acción y reacción sino la conservación del momento.* ( Berkson 1985).

En 1904 presentó la modificación de la Teoría del electrón, que presentaba la construcción de las ecuaciones que hoy llamamos de transformación de Lorentz. Las ecuaciones de transformación, las mismas que serán obtenidas en el trabajo de Einstein de 1905 sobre bases diferentes, aparecían tal y como señala Holton (Holton 1979) de forma un tanto forzada y con un análisis conceptual muy diferente al relativista: el tiempo local, aparecía como un artificio matemático sin significación física. La explicación de la contracción hacía intervenir el éter en tanto el movimiento absoluto del cuerpo la ocasionaba. La incapacidad de detectar variaciones en la velocidad de la luz no se basaba en un rechazo a los supuestos básicos de la transformación de Galileo sino a mecanismos de compensación que hacían indetectable la modificación.

A Poincaré puede atribuirse, sin duda, un papel importante en la creación de conceptos básicos de la relatividad especial. En sus textos de comienzos de siglo, 1905, y sobre todo el famoso de 1906 (*Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*) reafirmó la importancia del principio de relatividad, reafirmando su compatibilidad con la Teoría electromagnética y las propiedades matemáticas de la transformación de Lorentz. Trató sobre aspectos tales como simultaneidad, formación de los conceptos de espacio, tiempo, etc..

Es claro que a estas alturas la Física estaba muy lejos de las concepciones clásicas. Sin embargo, todavía no se efectuaba una modificación conceptual en los conceptos clásicos de espacio y tiempo y su consecuente aceptación por la comunidad científica. La insatisfacción crítica parecía cristalizar en la aceptación de la Teoría de Lorentz, que mantenía los presupuestos clásicos.

### **2.2.3.6 La publicación en 1905 de la Teoría especial de la relatividad de Einstein.**

El artículo de Einstein se fundamenta en dos postulados: el principio de relatividad y el principio de invarianza de la velocidad de la luz . La teoría conduce al rechazo de la noción de éter, como innecesario para explicar los fenómenos electromagnéticos. De hecho, el rechazo al concepto de espacio absoluto arrastra al sistema privilegiado de éter en reposo y pone demanifiesto su carácter artificioso. Las bases de la teoría se toman de un análisis detallado de los presupuestos básicos y no parte propiamente de una base

electromagnética. Tan sólo se retiene la constancia de la velocidad de la luz en coherencia con el principio de relatividad.

Este artículo apareció *después de un prolongado período de reflexión sobre algunos aspectos de la teoría electromagnética de Maxwell, más que de cualquier referencia especial por su parte a los resultados del experimento de Michelson Morley* (Holton 1979). Así como asimetrías en los fenómenos electromagnéticos.

La concepción de tiempo y espacio cambia. El tiempo pierde su carácter absoluto, y su universalidad. El concepto de simultaneidad se modifica radicalmente y se establece el carácter invariable de todas las ecuaciones que expresan leyes fundamentales de la física. Se resuelve la incongruencia de que los sistemas Inerciales son indistinguibles por experimentos mecánicos internos pero sí parecían serlo mediante experimentos electromagnéticos. El ajuste se ha realizado asumiendo como válida tanto la teoría electromagnética como el principio de relatividad. La mecánica clásica permanece en el caso límite ordinario, de gran importancia práctica y teórica.

La alteración del espacio es importante, no es un ente abstracto, externo, en cuyo interior se mueven unos sistemas de referencia análogos a varillas rígidas. De hecho, cada sistema de referencia acarrea un espacio asociado con su correspondiente asignación de coordenadas. Más aún, surge el concepto de espacio-tiempo como un ente que resume ambos conceptos.

El principio de relatividad de Galileo supone ya una modificación importante de los conceptos de espacio y tiempo, cuya potencialidad no se desarrolla por el corsé que supone la noción de la existencia de un espacio absoluto, en efecto, podemos decir que un cuerpo está en un punto en un instante, y en otro instante posterior, porque podemos admitir la persistencia del punto a lo largo del tiempo. Si *todos* los movimientos fuesen relativos y careciese de sentido el reposo absoluto ¿qué puntos mantienen su identidad y configuran el espacio? Se abriría la puerta a considerar infinitos espacios en pie de igualdad.

Si por ejemplo se supone una caja y su SR asociado se puede establecer una métrica, y un tiempo común a todos los puntos, considerar y evaluar el espacio encerrado. Si otra caja se moviese en su interior con un MRU se puede considerar un flujo de espacio por sus caras al moverse, evaluándolo en cada instante considerando la simultaneidad de posición entre las caras. Si se evalúa desde el SR de la otra, el estatus del espacio que define, es tan real como el otro asumiendo el principio de la relatividad con el rechazo del espacio absoluto. Si se da el paso de la relatividad especial y se incorporan las modificaciones en la simultaneidad los diferentes espacios no comparten ni siquiera aspectos tales como la evaluación del volumen del espacio que encierran ambas cajas.

La simultaneidad de los sucesos tan solo guarda el carácter absoluto para sucesos que ocurren en el mismo lugar en igual tiempo. Y se divide el

espacio-tiempo según el carácter de los intervalos en espaciales, temporales, o de género luz. Clarificando los nuevos vínculos causales entre sucesos.

### **2.2.3.7 El rechazo a la teoría del electrón de Lorentz y la aceptación final de la Teoría de la Relatividad.**

Este proceso se realizó paralelamente con el desarrollo de la Teoría General, fue un proceso complejo y, salvo en Alemania, encontró dificultades para su aceptación en otros países.

La situación era tal que *“durante varios años después de 1905, era muy común entre los físicos el no distinguir entre la teoría de Maxwell- Lorentz y la relatividad de Einstein. Este fue el caso -durante algunos años- de Lorentz... En algún momento entre 1909 y 1915, año en que publicó su The Theory of Electrons, Lorentz cambió de opinión (Sánchez Ron 1985), asumiendo lo que de innovador revestían las ideas de Einstein frente a su propia teoría . Esta posición de un líder clave es representativa de la aceptación generalizada de la comunidad científica.*

Por último cabe indicar que el concepto de espacio que surge de la Teoría General es indisoluble de la idea de campo. Conforme a la mecánica clásica y la relatividad especial el espacio existe con independencia de la materia o los campos y en él se sitúan estas. La visión de la TGR. es la de un espacio que no existe sin relación a la materia o los campos, la propia topología del mismo surge en esta relación.

En la física más actual, en la mecánica cuántica y la relatividad, las dos grandes teorías de la física, el tiempo juega un papel diferente y cabe la posibilidad de que el tiempo aparezca en una futura teoría unificada como una magnitud muy distinto a como ahora se concibe. En el modelo estándar, firmemente asentado en lo experimental, los mecanismos de interacción que atribuyen masa a las partículas manejan conceptos tales vacíos llenos de un campo que sólo interacciona con las partículas con masa, que reeditan problemas teóricos análogos al viejo éter.

En estos conceptos fundamentales falta contar con una verdadera teoría fundamental plenamente asentada que trace el cuadro final, de momento, las modernas teorías de cuerdas que incorporan la gravitación, manejan otras dimensiones temporales asociadas a fluctuaciones cuánticas del espacio-tiempo. Y en cuanto al espacio, proponen espacios de muchas dimensiones que posteriormente se reducen a tres. (De Yndurain, F.1998).

### **2.2.3.8 Acerca de la posición de Einstein sobre el concepto de masa relativista**

La posición, o mejor dicho las posiciones mantenidas por Einstein, han de ponerse en relación con el contexto científico en que se formularon, por lo que es conveniente seguir un hilo conductor histórico.

Las ideas acerca de la variación de la masa con la velocidad son de origen prerrelativista, en el marco del programa de investigación de la teoría del electrón. Y se atribuían, al igual que la contracción de Lorentz, a procesos físicos que ocurrían en el electrón a alta velocidad con relación al éter. Estas ideas *sonaban* en la mente de los físicos a lo largo del proceso de difusión y depuración de la Teoría de la Relatividad. Se profundizarán estas ideas más adelante en este trabajo, al realizar la fundamentación histórica de las hipótesis.

Einstein, una vez fijado el marco relativista, introdujo la vinculación masa-energía, por primera vez en su publicación de 1905: *¿Depende la inercia de un cuerpo de su contenido energético?*, pero únicamente en el sentido de la energía equivalente a la masa en reposo. Este concepto es original de Einstein, y se restringía a la pérdida (ganancia) de masa por radiación. Se considera como punto de origen de la ecuación  $E = mc^2$ . (Fadner 1988)

En 1906 Einstein introdujo la transferencia de masa que conllevaba el intercambio de un fotón lo que implicaba la aceptación de una masa relativista en forma de  $E/c^2$ . Este es el contenido clave del famoso experimento mental (Gedanken) del *Fotón en una caja*.

Las ideas de Einstein se iban depurando, la asignación de masa al fotón fue muy fructífera y jugó un papel heurístico de primer orden para el desarrollo de la teoría general de la relatividad, (por ejemplo, efectos gravitatorios de la trayectoria del fotón),(Okun 1989). Aunque esta idea quedo superada una vez se desarrolló de forma completa la Teoría General, y se incluyó las consideraciones geométricas y topológicas.

En un artículo menos conocido de 1907 *“La inercia de la energía, como es exigido por el Principio de Relatividad.”* extiende el concepto de inercia de la energía y formula:  $E = \mu_0 (1 - v^2/V^2)^{-1/2}$  ; donde  $\mu_0 = E_0/V^2$ , explicitando la energía de la masa en reposo. *La diferencia esencial entre Einstein y las teorías competidoras es que las formulas de las masas de Einstein son artefactos de la transformación cinemática del espacio y tiempo.* (Adler 1987) Esta idea es importante en tanto que el comportamiento de partículas a altas velocidades es un hecho experimental que puede analizarse desde la perspectiva de un proceso que ocurre en la partícula o desde la perspectiva de un análisis de espacio y tiempo.

La formulación de la masa relativista en la forma  $m_r = \gamma m_0$  fue realizada en 1911 por Lewis, Tolman y Epstein, así como la formulación inercial para todos los casos de Fuerzas y aceleraciones (casos de masas longitudinales y transversales) usando  $F = dp/dt$ , lo que permitió clarificar una proliferación de *masas* (Fadner 1988). *Observemos de paso que esta formulación en un contexto de inicios de la TER casó con las ideas de masa variable del programa electromagnético* En 1913 Langevin uso  $E = mc^2$  para procesos radiactivos.

Una vez desarrollada la Teoría General el propio Einstein asignó toda esta casuística a la estructura del espacio-tiempo, prescindiendo de conceptos tales como la masa del fotón. El fotón sigue las geodésicas de la topología del nuevo espacio y no cabe usar efectos gravitatorios sobre una supuesta masa.

La posición de Einstein acerca de la masa fue influida muy fuertemente por la formulación tensorial de Minkowski (Adler 1987), con el invariante por  $pc)^2 - E^2 = -m^2 c^4$ . Se muestra claramente en su exposición de 1922 "El significado de la relatividad" con la teoría ya consolidada. (Okun 1989) (Adler 1987) en que utiliza la masa invariante por ejemplo con  $E_0 = mc^2$ .

En posteriores ocasiones se reafirma en esta línea. Desaconsejando, incluso de una manera categórica, el uso de la masa dependiente de la velocidad (carta a Barlet en 1948):

*"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 "el resto de masa"  $m$ . En vez de introducir  $M$  es mejor hacer mención a la expresión del momento y la energía de un cuerpo en movimiento."* (Okun 1989).

### **3 CONCRECIÓN Y OPERATIVIZACIÓN DE LAS HIPÓTESIS, DISEÑOS EXPERIMENTALES PARA SU CONTRASTE**

Una vez fundamentada la hipótesis emitida en el capítulo precedente, utilizando para ello los argumentos derivados de la investigación didáctica, y considerados los puntos clave señalados en la bibliografía, es preciso desglosar la hipótesis emitida, y operativizarla en orden a su contrastación experimental. En este paso constituye una guía de interés el proceso histórico estudiado por la Historia de la Ciencia y para centrar las dificultades que se presentan en la adquisición de las ideas clave, en la depuración de conceptos, en el establecimiento de la teoría y su aceptación.

#### **3.1 OPERATIVIZACIÓN DE LA HIPÓTESIS**

La hipótesis señala que: “ Los conceptos de tiempo y espacio, sus propiedades y simetrías, así como los distintos sistemas de referencia, se introducen ya desde los niveles inferiores de la secundaria de forma desestructurada, acrítica y poco reflexiva. La enseñanza de la Teoría de la Relatividad se realiza de forma poco clarificadora, sin tener en cuenta las preconcepciones de los alumnos, y sin resaltar su posición en la estructura de la Física. En consecuencia, el aprendizaje es escasamente significativo y no se consolidan las nuevas concepciones en los estudiantes”.

De esta hipótesis podemos derivar tres subhipótesis que correspondan a los tres pilares principales del problema: profesores, materiales curriculares (libros de texto) y los propios estudiantes. Es decir: el profesor como agente responsable del enfoque dado a la enseñanza de los conceptos de espacio, tiempo, relatividad etc.; Los libros de texto como fuente de primer orden para los contenidos y las secuencias didácticas; el propio alumno como variable principal y sujeto clave del aprendizaje.

Podemos enunciar las tres de subhipótesis de la siguiente manera:

**1.- Los libros de texto utilizados los niveles inferiores de la secundaria no presentan adecuadamente los conceptos de tiempo y espacio. En el 2º de bachillerato la enseñanza de la Teoría de la Relatividad se plantea de forma poco clarificadora, sin tener en cuenta las preconcepciones de los alumnos, y sin resaltar su posición en la estructura de la Física.**

**2.- La práctica habitual no favorece un aprendizaje significativo, los profesores introducen, de forma, acrítica y poco reflexiva los conceptos, desde orientaciones epistemológicas distorsionadas y sin contar con los resultados de la investigación didáctica**

**3.- Los alumnos, como consecuencia de la enseñanza recibida muestran un aprendizaje escasamente significativo y se consolidan poco las nuevas concepciones en los estudiantes”.**

Estas subhipótesis se operativizan mediante un desglose pormenorizado, tal y como se muestra a continuación, de forma que sean susceptibles a un contraste experimental.

### ***3.1.1 Operativización de la subhipótesis primera acerca de la forma en la que los libros texto introducen la TER y sus fundamentos.***

De la subhipótesis podemos derivar los siguientes enunciados operativos, cuyo contenido es equivalente. Según la subhipótesis se espera que los textos:

- 1- No profundizarán en la epistemología y en las dificultades que originaron el surgimiento de la TER y darán una imagen lineal, acumulativa, distorsionada del desarrollo de la ciencia.
- 2- No clarificarán suficientemente los conceptos de espacio, tiempo,... ni su evolución desde las concepciones clásicas.
- 3- No resaltarán adecuadamente el estatus de la teoría en el marco de la física y darán más importancia a ciertas expresiones matemáticas (por ejemplo, las transformaciones de Lorentz) que a la comprensión de cambios de perspectivas y fenómenos.
- 4- No mostrarán una visión actualizada de la masa en la TER y la relación masa-energía no recibirá un tratamiento exento de errores.
- 5- Los libros mostrarán una dispersión importante en los contenidos seleccionados y la profundidad de los tratamientos.
- 6- Los libros contendrán un número significativo de errores conceptuales no depurados.
- 7- No tendrán en cuenta las relaciones de la TER con la tecnología y la sociedad.

### **3.1.2 Operativización de la subhipótesis segunda acerca de la forma en la que los profesores introducen la TER y sus fundamentos.**

Su enunciado se considera equivalente a los siguientes puntos acerca de las ideas y procedimientos utilizados por los profesores.

- 1- Los profesores mantendrán ideas epistemológicas simples y distorsionadas sobre el surgimiento de la Teoría de la Relatividad
- 2- No tendrán en cuenta las ideas previas de los alumnos.
- 3- No resaltarán adecuadamente el estatus de la teoría en el marco de la Física..
- 4- No mostrarán una visión actualizada de la masa en la Teoría de la Relatividad y la relación masa-energía no recibirá un tratamiento exento de errores.
- 5- Los profesores no valorarán el estudio de la TER en la secundaria y le atribuirán una alta dificultad , además le dedicarán poco tiempo.

### **3.1.3 Operativización de la subhipótesis tercera**

Como consecuencia del proceso de enseñanza los estudiantes mostrarán un aprendizaje escasamente significativo y con escasa estabilidad, en concreto:

- 1- Mostrarán ideas prerrelativistas, (newtonianas ingenuas o incluso alternativas en los niveles inferiores) en el manejo de los conceptos básicos de espacio y tiempo.
- 2- No manejarán adecuadamente las nociones de SR, SRI, y principios de relatividad (clásico-TER)
- 3- No asumirán una visión correcta de lo esencial de la TER en el marco de la física.
- 4- No mostrarán una visión actualizada de la masa en la Teoría de la Relatividad y no se manejará la relación masa-energía de un modo exento de errores.

## **3.2 DISEÑO PARA CONTRASTAR LA SUBHIPÓTESIS PRIMERA**

La revisión de libros de texto, como material curricular principal, se realizará en tres niveles: 4º de ESO, 1ºBachillerato LOGSE y 2º de Bachillerato.

En los dos primeros, se revisará acerca de la caracterización clásica del espacio y tiempo, sistemas de referencia, fundamentos epistemológicos, la introducción de magnitudes físicas y los conectores hacia la Teoría de la Relatividad. Apuntes acerca de los límites del marco clásico.

**3.2.1 Cuestionario de libros de texto**

<b>1. 4º ESO Y 1º BACHILLERATO</b>		<b>SÍ</b>	<b>NO</b>
1.1	¿Se presenta de una forma dinámica y no dogmática la génesis de la física Newtoniana planteando expresamente sus límites de validez?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1.2	¿Se indagan, aún brevemente, los presupuestos de las concepciones Newtonianas del espacio y el tiempo?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1.3	¿En la introducción de las leyes de Newton, se analiza el concepto de masa y se efectúa una clarificación entre la perspectiva inercial y gravitatoria?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1.4	¿En el aprendizaje de la cinemática o la óptica se aborda, aunque sea tangencialmente el problema de la medición de la velocidad de la luz, Y su relevancia lógica y epistemológica?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

<b>2. COMPLEMENTO PARA 1º DE BACHILLERATO</b>		<b>SÍ</b>	<b>NO</b>
2.1	¿Se usa, aún ocasionalmente, en el estudio de la mecánica la valoración de trayectorias, y otras magnitudes, desde distintos sistemas de referencia?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2.2	¿Se plantea el principio de relatividad de Galileo, discutiendo explícitamente sus hipótesis subyacentes?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2.3	¿Se enuncia el principio de relatividad galileano en relación a la invarianza de los leyes de la mecánica, o como una mera transformación de velocidades y posiciones entre sistemas?.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**CUESTIONARIO DE LIBROS DE TEXTO 2º BACHILLERATO:**

<b>1.-Aspectos epistemológicos e históricos</b>		<b>SÍ</b>	<b>NO</b>
1.1	Se muestra, aún brevemente el contexto problemático de los experimentos y sus hipótesis de partida.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1.2	Se pondera la importancia del experimento de Michelson y Morley	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

<b>SÍ</b>	<b>NO</b>
-----------	-----------

1.3	Se ofrece una visión tentativa en el avance científico, y el papel comunitario del avance	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1.4	Se hace un uso de la figura de Einstein, que no suponga una distorsión de la imagen del científico	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1.5	Se valora adecuadamente el aspecto acumulativo no lineal del avance científico	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1.6	Se recoge la existencia de resistencias al cambio.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1.7	Se destacan las limitaciones derivadas de la propia naturaleza del conocimiento científico	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1.8	Se muestran, aun tangencialmente las repercusiones del avance científico en el entorno cultural.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

2.-Aspectos lógicos

<u>Ubicación en el marco de la Física</u>		<b>SÍ</b>	<b>NO</b>
2.1	Se resalta su papel central y su radical innovación acerca de la noción del espacio y el tiempo	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2.2	Se resaltan sus repercusiones en todas las áreas de la física ej. sobre nociones como acción a distancia, física de partículas, etc.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<u>Principios, postulados e ideas a cerca de la propagación de la luz</u>		<b>SÍ</b>	<b>NO</b>
2.3	Se resalta la relación entre el Principio de relatividad y la relatividad galileana	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2.4	Se menciona que igualdad de velocidad no implica igualdad en el resto de características de la luz.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2.5	Se muestran limitaciones al uso de los sistemas inerciales y se avanza su extensión otros sistemas.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

3.-	Aspectos clave, consecuencias	<b>SÍ</b>	<b>NO</b>
3.1	Se insiste en el papel de la medición, observadores etc., en línea con el operativismo.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

	SÍ	NO
3.2 Se da a entender su aplicación en exclusiva a altas velocidades	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<u>Ideas acerca del espacio, longitud.</u>	SÍ	NO
3.3 Se clarifican las posibles ideas alternativas de los alumnos en línea con ideas mantenidas en otros tiempos ej. Contracción de Lorentz Se clarifica la visión microscópica de la contracción	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3.4 Se muestra la simetría entre los magnitudes en dos sistemas inerciales distintos.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3.5 Se evita la confusión entre <i>ver</i> y <i>medir</i> que son conceptos diferentes	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3.6 Se insiste en la asimetría de las distintas direcciones	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<u>Ideas acerca del tiempo.</u>	SÍ	NO
3.7 Se precisa el concepto de tiempo propio	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3.8 Se insiste en la simetría entre las mediciones en SRI distintos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<u>Composición de velocidades.</u>	SÍ	NO
3.9 Se compone alguna velocidad con la de la luz para reafirmar los problemas de aditividad.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<u>Acerca de la energía y la masa.</u>	SÍ	NO
3.10 Se introduce el concepto de masa relativista.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3.11 En este caso, la introducción es consistente y se exponen sus limitaciones y eventuales inconvenientes.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3.12 Se establece de forma correcta la equivalencia masa-energía.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<u>Otros aspectos</u>	SÍ	NO
3.13 Se usan correctamente las expresiones relativistas en todos los casos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

	SÍ	NO
3.14 Se reafirma explícitamente la validez del principio de conservación de P en un SRI así como la de otras leyes de la física.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3.15 Se apuntan aspectos clave de la Teoría General de la Relatividad	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3.16 El texto incluye profundizaciones de mayor nivel	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**3.2.2 Comentario al cuestionario de libros de texto primer nivel. Criterios para la valoración de los ítems:**

**1. 4º ESO Y 1º BACHILLERATO**

La génesis de la mecánica clásica es un proceso complejo con infinidad de perspectivas. En su enseñanza cabe asomar a los alumnos a la complejidad de su elaboración, el marco conceptual de la teoría y su campo de validez. Sin

1.1 ¿Se presenta de una forma dinámica y no dogmática la génesis de la física Newtoniana planteando expresamente sus límites de validez?

estas limitaciones la imagen que se forma el estudiante puede estar muy distorsionada. Desde el punto de vista de la posterior enseñanza de la relatividad, es muy conveniente que se haya realizado esta introducción reflexiva, y que efectivamente no se presente como “ la verdad absoluta” sino que se lancen apuntes, conectores hacia elaboraciones posteriores.

No es esta la hipótesis operativa, (S1-H1), por el contrario se espera que la visión de la ciencia presentada a los estudiantes presente, salvando la lógica simplificación, una imagen distorsionada de la ciencia y que no se delimite el campo de validez de la mecánica newtoniana.

1.2 ¿Se indagan, aún brevemente, los presupuestos de las concepciones Newtonianas del espacio y el tiempo?

Se parte del supuesto, en consonancia con la hipótesis (S1-H2), que los conceptos de espacio, tiempo y sus atributos serán despachados con una mención superficial pasando a utilizarlos directamente en una cinemática matematizada, sin una reflexión sobre las concepciones subyacentes. Esta omisión es relevante con relación a los esquemas mentales de los alumnos. De hecho, cuando algún alumno afirma por ejemplo que en el vacío los cuerpos no pesan está necesitando de un medio que transporte la interacción y usando concepciones próximas al cartesianismo.

Deberían plantearse algunas de las propiedades del espacio, al menos su carácter absoluto, continuo (es isomorfo a un espacio tridimensional real euclídeo), homogéneo, sin direcciones privilegiadas (isotropía) y los atributos del tiempo: homogeneidad, igualdad en todos los puntos y para cualquier observador (carácter universal). Este carácter de universalidad referido a las leyes físicas exige al menos que sea independiente de cualquier tiempo, orientación en el espacio o posición. En el estudio del cuestionario de alumnos se analizan más detalladamente estas propiedades.

En caso de que no se planteen suficientemente, al menos parcialmente, se reforzará la hipótesis.

1.3 ¿En la introducción de las leyes de Newton, se analiza el concepto de masa y se efectúa una clarificación entre la perspectiva inercial y gravitatoria?

Las dificultades de una definición correcta de masa en el marco clásico se han puesto de manifiesto por numerosos autores, ver Domenech (1988). En todo caso el ítem pretende controlar si esta introducción ha sido rica, si ha alcanzado a reflexionar sobre la diferenciación conceptual entre la masa inercial y gravitatoria (en 1º bachillerato), y si se han apuntado posibles ampliaciones del concepto en un marco superior (Teoría Relativista) o por el contrario conforme a la hipótesis (S1-H1) no se ha realizado.

1.4 ¿En el aprendizaje de la cinemática o la óptica se aborda, aunque sea tangencialmente el problema de la medición de la velocidad de la luz, Y su relevancia lógica y epistemológica?

La constancia de la velocidad de la luz para todos los SRI constituye el 2º postulado de la teoría especial. En los textos se maneja tanto la composición de velocidades en los temas de mecánica, como nociones de óptica física y geométrica. A pesar del marco clásico en que se está trabajando surge por tanto la cuestión de si se ha aprovechado estas ocasiones, para sembrar alguna sugerencia acerca de las especiales particularidades de la luz. ¿Se ha usado acriticamente de la luz, o en su estudio se ha anunciado el papel esencial que desempeñará en un nivel más profundo de la física?.

La hipótesis operativa (S1-H1) se verá reforzada si efectivamente estos apuntes críticos no se realizan.

## 2. COMPLEMENTO PARA 1º DE BACHILLERATO

2.1 ¿Se usa, aún ocasionalmente, en el estudio de la mecánica la valoración de trayectorias, y otras magnitudes, desde distintos sistemas de referencia?

El análisis de algunos problemas, al menos en la cinemática, desde diferentes SR. permite formar en el estudiante la noción de que hay magnitudes que no son absolutas, sino función del sistema de referencia. Le permite explicitar los sistemas, en vez de usarlos de forma implícita. Por otra parte comienza a utilizar la noción de transformación de magnitudes entre sistemas, y le permite adquirir las destrezas procedimentales necesarias. Por otra parte esto conduce de forma natural a indagar sobre la existencia de SR preferentes, en reposo absoluto; la enseñanza posterior de la Teoría de la Relatividad será facilitada así en gran medida

Cabe entonces valorar si este tratamiento se da en realidad, o como se indica en la hipótesis (S1-H2) no se efectúan tratamientos clarificadores de estos aspectos.

2.2 ¿Se plantea el principio de relatividad de Galileo, discutiendo explícitamente sus hipótesis subyacentes?

Una discusión amplia del principio de relatividad de Galileo a este nivel debería incluir las ideas subyacentes que posibilitan el principio y que efectivamente dieron lugar a su formulación histórica en el XVI-XVII, y el incremento de su estatus a lo largo del S XVIII, hasta situarlo como algo obvio en el marco newtoniano.

- a) Concepto de Sistema de Referencia Inercial. Relación con las propiedades atribuidas al espacio.
- b) Se indica expresamente la variable tiempo y su universalidad entre sistemas, es decir que una vez ajustados los valores entre los sistemas, por ejemplo compartiendo el origen arbitrario su valor es el mismo, transcurre exactamente igual para los distintos observadores.  
 $t = t'$

Si este tratamiento se efectúa, se dispondrá de una base sólida para desarrollar la Teoría de la Relatividad.

En concordancia con nuestra hipótesis operativa (S1-H2), si este tratamiento no tiene en cuenta los apartados a) b) se realiza de forma suficiente consideraremos apoyada la hipótesis.

2.3 ¿Se enuncia el principio de relatividad galileano en relación a la invarianza de las leyes de la mecánica, o como una mera transformación de velocidades y posiciones entre sistemas?.

Un tratamiento completo del principio debería incluir también una reflexión acerca de su significado profundo, más allá de su aplicación cinemática. Estudiando para ello tanto las ecuaciones de transformación entre sistemas como la vinculación entre la forma de las Leyes físicas (mecánicas) y SRI. La imposibilidad de determinar movimientos de traslación absolutos, (limitemos a ellos la discusión) y diferenciar entre sistemas de referencia inerciales mediante experimentos mecánicos.

Un aspecto que es de gran importancia es la fijación, o no de límites de validez, lo que da paso a un tratamiento relativista.

Si el texto incluye estos tratamientos, considerados como correctos entonces no contribuirán a apoyar la hipótesis consideradas (S1-H2), según a cual no se realizan estudios clarificadores de estos conceptos.

### **3.2.3 Comentarios al cuestionario de libros de texto 2º bachillerato. Criterios para la valoración de los ítems:**

#### 1.-Aspectos epistemológicos e históricos.

1.1 Se muestra, aún brevemente, el contexto problemático de los experimentos y sus hipótesis de partida.

La construcción de la TER es el resultado de un proceso complejo, surge como respuesta a una situación problemática específica que se supera con su formulación. No es por tanto una construcción arbitraria. La presentación a los estudiantes de la teoría parece que no puede sustraerse a los problemas que cuestionan la mecánica newtoniana, ni obviar las dificultades más relevantes del electromagnetismo y la óptica: Concepto de espacio absoluto, fuerzas instantáneas, papel de los campos. asimetrías e inducción, propagación de la luz, etc.

Se considera correcta y contraria a nuestra hipótesis (S1-H1), la discusión de esta situación como punto de partida de la introducción a la Teoría de la Relatividad

1.2 Se pondera la importancia del experimento de Michelson y Morley

El experimento de Michelson y Morley forma parte de cualquier exposición sobre la Teoría de la Relatividad, su espectacularidad y aparente carácter crucial le otorgan gran relevancia.

Sin embargo, no cabe el presentarlo como esencial en el proceso mental que orientó las reflexiones de Einstein. En esa inventiva parece que no jugó un papel relevante. E incluso parece que pudiera desconocerlo, sino totalmente, sí el detalle del mismo. Einstein realizó manifestaciones contradictorias en diferentes épocas de su vida (Holton 1982), (Sánchez Ron 1985) e indica también “.. ,hay que procurar evitar que nuestra perspectiva actual dé a los experimentos de Michelson una dimensión que en absoluto tuvieron cuando fueron planeados”.

Su uso como punto central desplaza la atención del primer postulado, verdaderamente esencial hacia el segundo, aparentemente más visual pero claramente subordinado al primero.

Por otra parte, una interpretación del experimento en el sentido de que su resultado negativo obliga a cambiar de manera inmediata la mecánica clásica supone una distorsión, una visión reduccionista de lo que es la ciencia y el papel de la experimentación. Más bien, en una primera instancia, un experimento de este tipo pondría en marcha los mecanismos de protección de la teoría en el sentido de Lakatos.

Se considera correcta y contraria a nuestra hipótesis (S1-H1), un tratamiento del experimento que no le otorgue ese papel decisivo, o al menos que mencione que no fue crucial para Einstein.

1.3 Se ofrece una visión tentativa en el avance científico, y el papel comunitario del avance.
--

Hay una doble faceta en la cuestión, por un lado la respuesta a la situación problemática de la física en el comienzo de siglo no fue ni automática ni única. Exponerlo así explícitamente, o por simple omisión, supone obviar como mínimo, las importantes aportaciones de Lorentz, Planck y los físicos centroeuropeos. Por otra parte, la teoría de la relatividad debe gran parte de su enfoque y está marcada de una forma clara por Einstein. Ahora bien, no es correcto ni menospreciar las aportaciones de grandes físicos como Lorentz, o matemáticos como Poincaré o Minkowski (de hecho para algunos estudiosos sería más propio referirse a ella como relatividad Einstein-Poincaré). Tampoco es admisible forzar en el sentido de minusvalorar la aportación esencial de Einstein de forma análoga a la famosa cita de Whitaker, quien en su famoso libro *A History of the Theories of Aether and Electricity* (1953) el capítulo de relatividad lo titula como “ The Relativity Theory of Poincaré and Lorentz”. Por otra parte el mismo autor no minusvalora el papel de Einstein en la Teoría General.

Se considera correcta y contraria a nuestra hipótesis (S1-H1), un tratamiento que proporcione crédito a alguna de estas figuras además de las referencias principales que corresponden evidentemente a Einstein.

1.4 Se hace un uso de la figura de Einstein, que no suponga una distorsión de la imagen del científico.

La figura de Einstein, gracias a su inmensa popularidad se ha convertido en un prototipo de gran científico. La indudable genialidad de Einstein y su papel clave en el desarrollo de la Teoría no debería conducir a la mitificación del personaje a la asignación a Einstein de todo tipo de expresiones propias de la teoría, sino al estudio de su figura y pensamiento en el marco de la ciencia y la sociedad de su tiempo, y mucho menos a inducir en los alumnos una imagen sesgada de la que es la ciencia y su elaboración.

Es favorable a nuestra hipótesis (S1-H1) una insistencia desproporcionada en la genialidad en la ciencia y en la mitificación de Einstein.

1.5 Se valora adecuadamente el aspecto acumulativo no lineal del avance científico.

El surgimiento de la TER no corresponde a un periodo de “ciencia normal” en el sentido de Kuhn (1975) sino que por el contrario resulta ser uno de esos procesos de cambio acelerado en que se produce una mutación del paradigma vigente. Es por tanto un ejemplo excelente a partir del cual cabe desarrollar una concepción epistemológica más madura.

Son considerados como incorrectas y por tanto favorable a nuestra hipótesis de una epistemología distorsionada (S1-H1), aquellas introducciones que no valoren el aspecto de crisis de paradigma.

1.6 Se recoge la existencia de resistencias al cambio.

Por otra parte, la aparente lógica incuestionable con que se presenta en los textos no debe inducir al alumno a suponer que su aceptación fue inmediata y clara para sus contemporáneos o que la respuesta de los físicos de su tiempo fue única. Si bien desde el principio físicos como Planck se adhirieron y desarrollaron la teoría. Otros como Lorentz, posiblemente el físico más importante de la época, no asumió la diferencia esencial entre los enunciados de Einstein y sus propios trabajos, sino mucho más tarde.

En Francia, USA o Gran Bretaña, la aceptación inicial fue escasa e incluso la reacción fue opuesta. El mismo Mach no la acogió favorablemente según confiesa Einstein a su amigo M. Besso, en carta de (6-1-48): “*Mach rechazó con dureza la Teoría Especial de la relatividad le parecía que sobrepasaba en especulación todo lo permitido*” (citado por Sánchez Ron(1985)).

La acogida española ha sido muy bien estudiada por Glick (1986) que resalta la acogida precoz de físicos de primera fila como Blas Cabrera, José María Plans que realizó las primeras aportaciones españolas a la Teoría General en los años veinte, o Esteban Terradas que la introdujo en los programas de física hacia 1915. Esta buena acogida inicial en círculos restringidos alcanzó a organizar la visita de Einstein a España en 1923, organizada por Terrades, Cabrera y el matemático Rey Pastor. Sin embargo estos inicios favorables fueron truncados por la Guerra Civil. En la posguerra un físico de la talla de Julio Palacios, el más representativo físico de mitad de siglo mantuvo una posición poco firme, favorable al principio, pero finalmente contraria a la interpretación ordinaria de la relatividad (publicó *Mecánica física y relatividad: Una nueva teoría* en 1960).

Son considerados como incorrectas y por tanto favorable a nuestra hipótesis de una epistemología distorsionada (S1-H1), aquellas introducciones que presentan la aceptación de la teoría de forma automática.

1.7 Se destacan las limitaciones derivadas de la propia naturaleza del conocimiento científico

La TER hace una crítica razonada de la mecánica newtoniana. A grandes rasgos, y simplificando, podemos decir que incluye a esta relegándola al importantísimo caso del límite de las bajas velocidades. Se origina entonces una situación reveladora del sentido de progreso en el conocimiento científico, la provisionalidad del mismo, y la existencia de marcos teóricos de validez.

Popper menciona en su *“Lógica de la investigación científica”*, base del falsacionismo, el impacto que le causó las afirmaciones del mismo Einstein en este sentido: “No podrá existir mejor destino para una teoría física que el que señalase el camino hacia una teoría más amplia, en la que continuase viviendo como un caso límite” .

La propia TER no es sino un caso límite de una teoría más amplia la Teoría General Relatividad. Y en última instancia esta deberá incluirse preservando su ámbito de validez en una teoría más profunda. Los intentos en ese sentido de Einstein se prolongan hoy en día en las teorías de Gran Unificación, supercuerdas, etc. Esto debe resaltarse al alumno de manera análoga a como en la presentación de la mecánica Newtoniana se debe reflexionar sobre sus bases lógicas y su marco de validez.

La hipótesis operativa que se postula es que tales limitaciones no se enuncian explícitamente, al igual que se soslayan restricciones evidentes de la teoría especial como la limitación exclusiva a SRI. Incluso si se mencionan nociones de la Teoría General se prescinde de la incompatibilidad de fondo, hoy no resuelta con la mecánica cuántica.

La mención a alguna restricción es contraria a nuestra hipótesis (S1-H1), siendo por el contrario las omisiones favorables a la misma.

1.8 Se muestran, aun tangencialmente, las repercusiones del avance científico en el entorno cultural.

El impacto de la teoría en la filosofía y la cultura es amplísimo y esta ampliamente acreditado, cabe señalar su papel en la filosofía de la ciencia, en particular del falsacionismo popperiano, el operacionismo, el Circulo de Viena, etc.

Como ejemplo del impacto popular de la teoría, y su mistificación, cabe referirse al corriente resumen del “todo es relativo” Aquí aparece una distorsión simplificadora corriente que identifica subjetivismo filosófico y relatividad. “Hoy se admite que la relatividad es más bien una tendencia absolutista en el orden del conocimiento; pues si bien la medida es relativa, depende del observador, la ley física es absoluta, la misma para todos los observadores (Lahera 1995)

En principio un texto moderno debe reservar un lugar relevante a las relaciones CTS, lo que se pone en cuestión en la hipótesis (S1-H7). Se considera correcta y contraria a nuestra hipótesis el tratamiento relevante de tales relaciones.

## 2.-Aspectos lógicos

### ***Ubicación en el marco de la Física***

2.1 Se resalta su papel central y su radical innovación acerca de la noción del espacio y el tiempo

Precisamente es en este campo donde se efectúan las innovaciones más profundas. Hay que detectar si efectivamente se clarifican las innovaciones que supone la teoría y si se conectan con el ya indicado de la estructura de las leyes físicas. Si se sitúa la teoría como una teoría fundamental, prerequisite para cualquier otra teoría física, todas las leyes físicas habrán de ser invariantes frente a una transformación entre sistemas de referencia inerciales, satisfacer las transformaciones de Lorentz.

La hipótesis propuesta (S1-H3) supone que no se resaltarán adecuadamente su estatus, ni su sentido profundo en el conjunto de la Física, si esto así se reforzará la hipótesis.

2.2 Se resaltan sus repercusiones en todas las áreas de la física, por ejemplo sobre nociones como acción a distancia, física de partículas, etc.

Los estudiantes de 2º de bachillerato, han estudiado previamente los fundamentos de la teoría de campos, electromagnetismo, etc. y avanzarán en otras áreas: física nuclear, de partículas, etc. De ahí que el estudio de la TER no pueda permanecer aislado, sin vinculación con el resto de la física estudiada. Parece necesario aportar imbricaciones de la TER con lo estudiado,

y lanzar igualmente conectores hacia nuevas áreas. De hecho, el propio Einstein en su artículo de 1905 comienza precisamente señalando un caso de asimetrías profundas en la explicación maxweliana de un fenómeno: El acercamiento entre un imán a una espira, en que solo está en juego un movimiento relativo, finalmente le lleva a concluir que no existe distinción absoluta entre campo eléctrico y magnético. El análisis de este caso particular excede el nivel de 2º de bachillerato por la fluidez que precisa en el manejo del electromagnetismo. Sin embargo si cabe hacer referencia a muchos otros campos, por ejemplo, se han manejado con los alumnos en el estudio de la gravitación, las dificultades de la acción a distancia, la relatividad en la simultaneidad que se ha introducido vuelve a cuestionar de nuevo ese concepto.

Sin centrarnos en estos casos particulares cabe estudiar si se proporcionan tales vinculaciones explícitas, o no. Y por tanto se apoyará la hipótesis (S1-H3)

*Principios , postulados e ideas a cerca de la propagación de la luz*

2.3	Se resalta la relación entre el Principio de Relatividad y la Relatividad Galileana.
-----	--

Esta relación profunda y su carácter unificador, nada obvio en los finales del siglo XIX, es un punto clave de la teoría especial y constituyó una heurística poderosa para la creación de la Teoría General, donde se reafirma.

La exploración sistemática del postulado, y sus consecuencias, deben ocupar un papel relevante en cualquier manual introductorio, no cabe limitarse a su mera enunciación. También es importante recoger si efectivamente se da cuenta del carácter absoluto que implica para las propias leyes físicas.

En nuestra hipótesis operativa (S1-H2) se supone que esa clarificación no se produce más allá de una mera declaración. En ese caso se refuerza la hipótesis.

2.4	Se menciona que igualdad de velocidad no implica igualdad en el resto de características de la luz.
-----	---

Parecería innecesario resaltar este punto, pero parece conveniente la precisión en un contexto elemental, en el cual se utiliza profusamente el postulado de la constancia de la velocidad de la luz, en contradicción flagrante con la aditividad galileana de velocidades. Cabe resaltar el hecho de que tal constancia se limita exclusivamente a la velocidad, y no a características tales como la frecuencia de la luz, tal y como la perciben diversos observadores inerciales. Observemos además, que tal modificación de frecuencias, no posee la misma simetría que la contracción de Lorentz para la longitud, puesto que esta es indiferente a que se aleje o acerque al observador, mientras que las modificaciones en frecuencia hacia el violeta o al rojo si incluyen el sentido del

movimiento. Los estudiantes si reciben informaciones variadas sobre este aspecto, por ejemplo relacionadas con la cosmología, el tamaño del universo...

En nuestra hipótesis operativa (S1-H6) indicamos que se dará una falta de atención a las preconcepciones de los alumnos y por extensión a sus líneas habituales de pensamiento. Por lo que esta omisión favorece a la hipótesis.

2.5 Se muestran limitaciones al uso de los sistemas inerciales y se avanza su extensión otros sistemas.

La teoría especial es aplicable a sistemas inerciales, no es adecuada para manejar SR No Inerciales. Esto es una limitación clara, tampoco resuelve el problema de la estructura del espacio-tiempo en presencia de materia, la existencia de interacciones entre partículas que involucren energías potenciales, etc.

Entre las limitaciones erróneas que a menudo se le atribuyen es la imposibilidad de estudiar movimientos acelerados. Incorrección que conviene controlar.

Según la hipótesis (S1-H2) no se clarificarán estos conceptos, por lo que si no se establecen tales reservas se considerará favorable a nuestra hipótesis.

### 3.-Aspectos clave, consecuencias

3.1 Se insiste en el papel de la medición, observadores etc., en línea con el operativismo.

La teoría trata con la realidad objetiva, y hay que ser cuidadoso con el peligro que emana de la utilización abusiva de términos tales como observadores y medición. Como en todas las ramas de la física, el antropocentrismo, o la necesidad de detección por un observador es una visión inadecuada del concepto de realidad física. Aunque siga muy presente en la literatura y en las convenciones didácticas hoy lo percibimos como un residuo operacionista, al que no cabe referirse en esta etapa de teoría consolidada. De todos modos en atención factores pedagógicos e históricos cabe permitir cierta licencia.

La hipótesis (S1-H2) enuncia que no se clarificarán estos conceptos por lo que en ese caso se reafirmará la hipótesis.

3.2 Se da a entender su aplicación en exclusiva a altas velocidades

Si esto fuese así limitaríamos el concepto de utilidad a la precisión de los cálculos mientras que la teoría supone un marco conceptual nuevo. Por otra parte se dan efectos relativistas a todas las velocidades y ámbitos, por ejemplo

el efecto Mosbauer. Los efectos asociados a la energía nuclear no involucran, ni mucho menos, esos rangos de velocidad.

Si se da a entender esta limitación a sólo bajas velocidades, se apoya la hipótesis (S1-H3).

Ideas acerca del espacio, longitud.

3.3 Se clarifican las posibles ideas alternativas de los alumnos en línea con ideas mantenidas en otros tiempos, por ejemplo la contracción de Lorentz, se clarifica la visión microscópica de la contracción

Una de estas ideas es el concepto de realidad, por ejemplo de trayectorias, longitudes o tiempos. Levich (1974) lo describe muy bien; *“Los conceptos muy extendidos de contracción aparente y variación aparente de la marcha de los relojes son poco afortunados... son hechos reales y objetivos, en modo alguno vinculados a ilusiones del observador.... La dificultad en comprender estas afirmaciones está vinculada exclusivamente a nuestra costumbre de considerar las nociones de longitud e intervalo de tiempo como conceptos absolutos.... Los conceptos de longitud e intervalo de tiempo son tan relativos como los de movimiento y reposo”*.

Otra de las ideas que se debe rastrear es la “realidad de la contracción”. Esta idea necesita clarificación: El alumno tiende a centrar su atención en la percepción de los procesos físicos asociados a la contracción. Si en los textos la contracción se asocia siempre a objetos es lógico pensar que el estudiante focalice su atención en los objetos más que en el propio espacio. La idea inicial introducida por Lorentz sigue esta línea, tal y como se refleja en su exposición de 1895 titulada “El experimento de Michelson” recogida por Williams (1968): *“... habría que imaginar que el movimiento de un cuerpo sólido a través del éter en reposo ejerce sobre las dimensiones de dicho cuerpo una influencia que varía con la orientación del mismo respecto a la dirección del movimiento”* y más adelante: *“ es muy probable que la traslación afecte a la acción entre dos moléculas o átomos ...”*

Si no se incide en estas cuestiones no se estará atendiendo a las ideas previas detectadas en la investigación didáctica, y por tanto se reafirmaría la hipótesis (S1-H2).

3.4 Se muestra la simetría entre las magnitudes en dos sistemas inerciales distintos.

Todos los sistemas de referencia inerciales son equivalentes y no se puede establecer ningún tipo de preferencia. Contribuir a desarrollar y afianzar esa idea en el estudiante pasaría por analizar, en alguna ocasión, un mismo evento en al menos dos sistemas de referencia distintos.

No parece necesario manejar transformaciones de Lorentz inversas, ni demostrar que la composición de transformaciones de Lorentz también lo son, elemento importantísimo en la estructura de la teoría, pero sí al menos, por hacer referencia explícita a la simetría de las situaciones entre distintos sistemas de referencia, ejemplificándolo.

Los alumnos tienden a privilegiar su sistema propio por lo que sin un tratamiento sistemático no se atendería didácticamente sus ideas previas (S1-H2).

3.5	Se evita la confusión entre ver y medir que son conceptos diferentes
-----	--

La diferencia entre los procesos de medición y los de visión no fue puesta de manifiesto hasta finales de los 50 de la mano de Terrell, Penrose y otros. Medir un objeto consiste en esencia, en registrar la posición de sus partes en un determinado instante, es decir simultáneamente en ese sistema de referencia. Por el contrario, ver consiste en registrar los fotones que llegan simultáneamente a un punto, observador o dispositivo. Si provienen de puntos no equidistantes fueron emitidos en instantes diferentes, lo que provoca una deformación de la imagen, giros parciales, etc. Un estudio detallado de la visión de una esfera, mediante un programa informático, ha sido llevado a cabo por Rubio (1994).

Desde la perspectiva de los libros de texto, es preciso ser muy cuidadoso para no inducir a los alumnos al error corriente de identificar visión con medición. Si por simplicidad se elude la diferenciación al menos no cabe incurrir en el error por descuido en el lenguaje en el propio texto, lo que se propone no es profundizar demasiado en esta idea sino evitar caer en el error el propio texto.

De nuevo un tratamiento descuidado o confuso incidirá en la propagación de errores y en falta de atención al conocimiento previo del estudiante.(S1-H6)

3.6	Se insiste en la asimetría de las distintas direcciones
-----	---

La contracción de Lorentz se efectúa en la dirección del movimiento, dicha contracción aparece de la misma forma tanto cuando el cuerpo se acerca como cuando se aleja, no existe el equivalente a un efecto Doppler para la longitud, que diferencia las frecuencias según sea el movimiento de alejamiento o de acercamiento. Por otra parte, la contracción no se da en las direcciones transversales al movimiento. Las direcciones que forman un ángulo con la dirección, manifiestan el comportamiento que se deduce de la descomposición en la dirección tangente y normal.

Poner de manifiesto la asimetría de la contracción precisa que se maneje al menos, un ejemplo de estudio de longitud en dirección transversal, que

contraste con lo que sucede en dirección longitudinal. No se clarifica el concepto si se manejan exclusivamente movimientos de alejamiento del observador.

En nuestra hipótesis se otorgará más preeminencia a aspectos matemáticos o formales que a una auténtica comprensión de los fenómenos (S1-H3). Si no se atiende con cuidado al estudio de la simetría se estará apoyando esta hipótesis.

*Ideas acerca del tiempo.*

3.7 Se precisa el concepto de tiempo propio

Dista de ser sencilla la ruptura de la concepción clásica de tiempo universal, común para todos los sistemas de referencia, y su sustitución por un concepto de tiempo local asociado íntimamente al espacio en su propio sistema de referencia. Que esto es así puede ejemplificarse por las dificultades del propio Lorentz que aunque introdujo este concepto de manera formal no le atribuyó realidad física.

Desde la perspectiva de un manual escolar, la clarificación de las nuevas concepciones del espacio y el tiempo es un objetivo prioritario, es preciso para ello definir y clarificar el concepto de tiempo propio y manejar situaciones donde se rompa la visión universal del tiempo que es la tendencia natural del estudiante.

Si no se actúa sobre este punto se estaría de nuevo favoreciendo la hipótesis operativa (S1-H2) que recoge precisamente la falta de clarificación de los conceptos básicos.

3.8 Se insiste en la simetría entre las mediciones en SRI distintos

En línea con la cuestión anterior cabe exigir a este nivel el estudio de algún fenómeno desde al menos dos sistemas de referencia, colocándolos en el mismo plano de realidad. O, mejor aún dos fenómenos análogos en dos sistemas de referencia y su percepción mutua.

Si el texto se limita, por simplicidad o economía, a mediciones desde un único sistema de referencia, no contribuirá a establecer la igualdad de estatus entre los distintos sistemas de referencia y afianzar el principio de relatividad.

De nuevo si no se insiste en la idea se refuerza la hipótesis (S1-H2).

Composición de velocidades.

3.9 Se compone alguna velocidad con la de la luz para reafirmar los problemas de aditividad.

La sustitución del principio de relatividad galileano por el de la teoría especial, encuentra dificultades conceptuales especiales en la ley de composición de velocidades. La aceptación formal como tal del segundo postulado, la constancia de la velocidad de la luz, no implica la interiorización completa, tal y como se ha indicado en la fundamentación de las hipótesis y muestran los trabajos de Hewson(1982) o Villani (1987).

El aspecto paradójico de este punto precisaría al menos componer alguna velocidad con la propia luz, resaltando y propiciando la asunción de los resultados contraituitivos. Esto no requiere el manejo de las transformaciones de Lorentz si se limita al plano cualitativo mediante algún ejercicio, ejemplo o estudio de casos.

En caso contrario no se trataría adecuadamente un ámbito de las preconcepciones de los alumnos favoreciendo la hipótesis (S1-H2).

Acerca de la energía y la masa.

3.10 Se introduce el concepto de masa relativista.

Una discusión de las opciones científicas acerca de la masa que se suscriben en este trabajo ya se ha realizado anteriormente en el primer capítulo. Se remite a ese apartado para una discusión detallada. Este ítem pretende simplemente registrar las opciones asumidas por los autores del manual.

Desde el punto de vista de la hipótesis operativa (S1-H4), se sostiene que se usará ampliamente de la masa relativista en detrimento de una concepción de masa invariante.

3.11 En este caso, la introducción es consistente y se exponen sus limitaciones y eventuales inconvenientes.

La introducción del concepto de masa relativista arrastra un conjunto de opciones anejas, tales como la asignación de masa al fotón. Cabe por otra parte quedarse a medio camino introduciendo el concepto de masa relativista pero asumiéndola de un modo convencional, no atribuyendo a dicha masa un carácter físico real sino simplemente formal. Es importante también el analizar

si la introducción de tal masa da lugar o no a su utilización en sustitución de  $m$  en expresiones clásicas tales como la ecuación  $F = m \cdot a$ , expresión que sería únicamente válida en sustitución de la llamada masa transversal y no en la dirección del movimiento.

En suma la respuesta a este ítem es positiva si la opción de masa escogida en el texto se usa de forma coherente.

La hipótesis operativa a contrastar (S1-H4) es la que sostiene la opción de masa propuesta por los autores no se desarrollará con un tratamiento sistemático coherente. Y aparecerán incongruencias y tratamientos adicionales erróneos. En este caso se señalarán los mismos y se considerará favorable a nuestra hipótesis.

3.12 Se establece de forma correcta la equivalencia masa-energía.

La opción acerca de la masa establecida en el texto analizado, arrastra un enfoque asociado y unos criterios de corrección en consonancia con la opción elegida; cabe controlar si está basada, o no, en la previa introducción del concepto de masa relativista y revisar cómo se maneja el problema de las reacciones nucleares, sistemas de partículas de obligado manejo, y problemas afines tales como la formación de pares... En todo caso, tanto se use, o no, la  $m_r$  se considerarán erróneas todas aquellas interpretaciones que supongan:

- a) El uso de la masa como “cantidad de materia”.
- b) La consideración de conversión masa en energía sin las matizaciones adecuadas; la idea errónea de que la desaparición de masa da lugar a energía en gran cantidad.

En efecto, puede variar la  $\sum m_i$  de las partículas del sistema, y dar lugar a una variación de  $E_c$ . En concreto para un sistema pudiera darse  $\Delta m = E/c^2$ , pero debemos atender al hecho de que no se está valorando entonces la masa del sistema en un sistema de referencia determinado, sino que se está considerando tan solo una parte ( la del resto); la evaluación completa del sistema inicial y final llevaría de forma directa a realizar el balance incluyendo la relación íntima entre  $E$  y  $P$ , así como la noción de masa invariante que expresa la ley de conservación energía-impulso.

Para una única partícula en un sistema de referencia cualquiera:

$$E^2 - (p^2 c^2) = m^2 c^4, \text{ con } E = \gamma m c^2$$

El primer término es el invariante del cuadrivector, el segundo es un escalar invariante. Si se extiende esta relación a un sistema aprovechando la linealidad en la energía y en la de la cantidad de movimiento (lo que permite su suma), para la determinación de la del sistema:  $E = \sum E_i = (\sum \gamma_i m_i c^2)$ ;  $p = \sum \gamma_i m_i v_i$

$$(\sum \gamma_i m_i c^2)^2 - (\mathbf{P}^2 c^2)^2 = M^2 c^4 \quad \text{ó sea : } E^2 - (\mathbf{P}^2 c^2)^2 = M^2 c^4$$

Por ejemplo si  $P=0$ , como en el caso de un gas en reposo,  $M$  ( que coincide con el invariante del sistema) es diferente a  $\sum m_i$ .

En el caso de un átomo puede definirse en el sistema CDM y usarse como masa invariante  $M = \sum m_i + (\sum E_{bi} + \sum E_{ci})/c^2$ , con  $m_i$  se indica la masa de las partículas constituyentes,  $E_{bi}$  la energía de enlace y  $E_{ci}$  la energía cinética interna.

Esta masa es la que se ha de incorporar en los balances para comprender tanto los procesos de desintegración nuclear como defecto de masa, formación de pares....

Tanto en el caso de adoptar la opción de masa invariante como en el de optar por masa dependiente de la velocidad, es preciso indicar que los balances de masa en el sentido literal planteado en las formulaciones de reacción en la forma  $A+B \rightarrow C+D$ , es decir  $\sum m_{i, inicial}$  y  $\sum m_{j, final}$  no responden al seguimiento de un sistema aislado, sino a la mera identificación de las partículas actuantes, y no cabe invocar el cumplimiento, o no, de la conservación de la masa. En términos estrictamente físicos de definición de la masa del sistema  $M \neq \sum m_i$ , tanto en la acepción de masa invariable como de masas relativista. Si el sistema no está aislado, cualquier variación de energía se acompaña de la correspondiente variación de masa.

Para el nivel que manejamos en el bachillerato no es preciso realizar estas precisiones de modo muy riguroso, no obstante no cabe admitir interpretaciones inadecuadas en la línea de conversiones masa energía, etc. Igualmente se evaluará en el ítem la presencia, o no del concepto de masa relativista. Nuestra hipótesis operativa(S1-H4) se verá apoyada en estos casos.

#### Otros aspectos y profundizaciones.

3.13 Se usan correctamente las expresiones relativistas en todos los casos

El criterio de corrección en las expresiones y ejemplos es importante, con él no se hace referencia a eventuales opciones de interpretación o metafísicas. Por el contrario son simple incorrecciones que se deslizan en el texto. De un modo ideal todo texto debería exento de tales errores.

Con este ítem se pretende dejar constancia de la existencia, o no, de eventuales errores (S1-H6). De su estudio se iluminan al diferenciarlos los simples errores materiales de lo que son puntos de especial dificultad.

3.14 Se reafirma explícitamente la validez del principio de conservación de P en un SRI así como la de otras leyes de la física.

El principio de la conservación de la cantidad de movimiento, al igual que la energía en un sistema aislado (y sin interacción entre sus partículas) se introduce expresamente como tales principios básicos. Este aspecto es destacado expresamente de un modo claro por French (1991), quien en referencia a los mismos escribe "...No estamos *descubriendo* estos importantes principio de conservación de la mecánica; estamos *afirmándolos* en realidad,...." A un nivel más profundo cabe buscar la raíz de estos principios en la propia estructura del espacio-tiempo. La isotropía y homogeneidad del espacio y la homogeneidad en el tiempo, conducen de forma directa con ellos. Cabe prescindir de poner de relieve otros principios básicos de conservación tales como el momento angular o la carga.

Cabe estudiar el modo en que se introducen, si se mencionan o no, el estatus de la introducción, si se introducen en un sistema etc.

Nuestra hipótesis operativa indica que no se clarificarán adecuadamente estas ideas y se dará una amplia dispersión en los tratamientos (S1-H5)

3.15 Se apuntan aspectos clave de la Teoría General de la Relatividad

El aspecto considerado es la explicación de los aspectos más asequibles de la Teoría General tales como el principio de equivalencia y algunos temas ilustrativos acerca de la luz tales como la desviación gravitatoria, concepto de agujero negro o corrimiento gravitacional al rojo...

El ítem se dirige a controlar la presencia de estas extensiones para evaluar su presencia en los textos y su generalidad, conforme a la hipótesis operativa (S1-H5).

3.16 El texto incluye profundizaciones de mayor nivel

Entre las profundizaciones que suponen un nivel superior, de difícil comprensión por los estudiantes, y que pudieran ser corrientes en un primer nivel universitario, se pueden citar:

- a) *Los diagramas de Minkowski* que fueron utilizados por él por vez primera en su famosa conferencia de 1908 sobre "espacio y tiempo". Su uso, incluso en su versión simplificada, exceden lo exigible a este nivel.

- b) El manejo de *nociones de tetradimensionalidad* Minkowski introdujo el espacio tetradimensional (desarrollando las ideas de Poincaré) incluyendo el tiempo como una cuarta dimensión, en este esquema interpretó las distintas transformaciones entre sistemas de referencia inerciales como rotaciones en dicho espacio. El espacio ordinario tridimensional resulta ser una proyección del espacio tetradimensional. En los niveles iniciales, la mención de estos conceptos supone una complicación importante, de muy difícil comprensión, por lo que su presencia en el bachillerato puede inducir más a confusión que otra cosa.
- c) *El uso del concepto de intervalo y el manejo de números imaginarios en su determinación.* La introducción de estas nociones excede con mucho el nivel razonable en bachillerato. La introducción de la formulación tetradimensional y el concepto de intervalo se puede rastrear hasta un estudio de 1906 debido a Henri Poincaré. La utilización de tales números se corresponde a una opción formal para mantener la estructura ortogonal euclídea en la definición de intervalos, distancias en el espacio tetradimensional introducido por Minkowski. Este concepto de intervalo es, a nuestro juicio desaconsejable en el nivel que se trabaja en los textos de bachillerato e incluso didácticamente muy complicado para un estudiante de secundaria quien ha estudiado los números complejos en matemáticas pero no los ha aplicado en ningún campo de la física, y que mantiene para él una (inadecuada) aura de irrealidad. Su utilización incrementa ante él el aspecto extraño del tema, sin aportar nada sustancial.

La hipótesis operativa (S1-H5) considera precisamente la presencia de estas profundizaciones. La contestación positiva refuerza la dispersión.

### 3.2.4 Relación entre las subhipótesis operativas y los ítems del cuestionario de libros.

	Subhipótesis operativas	Ítems	
		1 <sup>r</sup> nivel	2 <sup>o</sup> nivel
1.	No profundizarán en la epistemología y en las dificultades que originaron el surgimiento de la Teoría de la Relatividad y darán una imagen lineal, acumulativa, distorsionada del desarrollo de la ciencia.	1.1 1.3 1.4	1.1; 1.2; 1.3 1.4; 1.5; 1.6; 1.7;

2.	No clarificarán suficientemente los conceptos de espacio, tiempo,... ni su evolución desde las concepciones clásicas.	1.2 2.1, 2.2, 2.3	2.3; 2.5; 3.1 3.3; 3.4 3.7; 3.8;3.9
3.	No resaltarán adecuadamente el estatus de la teoría en el marco de la física y darán más importancia a ciertas expresiones matemáticas (p.ej., las transformaciones de Lorentz) que a la comprensión de cambios de perspectivas y fenómenos.		2.1; 2.2 3.2; 3.6
4.	No mostrarán una visión actualizada de la masa en la TER y la relación masa-energía no recibirá un tratamiento exento de errores		3.10; 3.11; 3.12
5.	Los libros mostrarán una dispersión importante en los contenidos seleccionados y la profundidad de los tratamientos		3.14; 3.15; 3.16
6.	Los libros contendrán un número significativo de errores conceptuales no depurados		2.4 3.5; 3.13
7.	No tendrán en cuenta las relaciones de la TER con la tecnología y la sociedad.		1.8

### 3.3 DISEÑO PARA CONTRASTAR LA SUBHIPÓTESIS SEGUNDA

#### 3.3.1 Cuestionario destinado a profesores:

##### 1.-Aspectos epistemológicos e históricos.

1.1 ¿Qué aspectos señalarías como más significativos, en el desarrollo histórico de la relatividad especial, y que a tu juicio deberían presentarse a los estudiantes?.

##### 2.-Cuestionario sobre introducción de conceptos

2.1 Indica que aspectos de relatividad convendría introducir y en que orden. Justifícalo brevemente. Indica, en cada caso, si se propone una introducción cualitativa o cuantitativa.

2.2 Señala aplicaciones tanto teóricas como prácticas de la relatividad

2.3	La ecuación $E=mc^2$ es una de las más conocidas y divulgadas. Cómo la explicarías a los alumnos para intentar que capten su significado
2.4	<p>Valora de 0 a 10 tu grado de acuerdo con las siguientes frases (0 totalmente en desacuerdo, 10 acuerdo total).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se puede prescindir de su conocimiento, en la enseñanza secundaria.</li> <li>• La teoría necesita un alto nivel para comprenderla los rasgos principales</li> <li>• Está poco conectada con el resto de la física estudiada en el bachillerato</li> <li>• Las fórmulas son complicadas y no ayudan a comprender lo esencial</li> </ul> <p>El tiempo que destinarías a este tema en 2º bachillerato sería de:_____</p>

### 3.3.2 Estudio de los items del cuestionario destinado a profesores. Criterios de valoración de los items.

#### 1.-Aspectos epistemológicos e históricos.

1.1	¿Qué aspectos señalarías como más significativos, en el desarrollo histórico de la relatividad especial, y que a tu juicio deberían presentarse a los estudiantes?.
-----	---

El surgimiento de la teoría de la relatividad es un caso paradigmático de la evolución y cambio en las teorías científicas; conceptos tales como paradigma, situaciones problemáticas, programas de investigación, falsación, etc., han de dar soporte a una reflexión sobre el desarrollo histórico de la Teoría de la Relatividad. La cuestión explora las concepciones epistemológicas de los profesores, y especialmente su inclusión o no, entre los contenidos relevantes del tema y en el proceso de aprendizaje de los alumnos.

Nuestra hipótesis de partida (S2-H1;H3) es la de que el profesorado no mantendrá una visión clara del proceso de elaboración de la teoría ni propondrá un uso significativo del mismo en el proceso de enseñanza-aprendizaje.

Se consideran como correctas y contrarias a nuestra hipótesis: La referencia a la situación problemática, con mención de alguna reserva de la noción de éter, dificultades del concepto de movimiento absoluto, indicaciones

sobre dificultades en la visión electromagnética de la naturaleza, la teoría del electrón..... Asimismo las indicaciones acerca del proceso de elaboración de la teoría especial, la heurística de Einstein, menciones a las aportaciones Poincaré, Lorentz, Minkowski. Las respuestas que incluyan reflexiones sobre la acogida por la comunidad científica de la TER y su incorporación al cuerpo de conocimientos etc..

## **2.-Cuestionario sobre introducción de conceptos.**

2.1 Indica que aspectos de relatividad convendría introducir y en que orden. Justifícalo brevemente. Indica, en cada caso, si se propone una introducción cualitativa o cuantitativa

Esta cuestión, presentada de forma abierta, intenta precisar qué ubicación en el marco de la Física se asigna a la teoría. En especial si se efectúa, o no, una valoración como teoría fundamental acerca de la estructura de las leyes físicas y la configuración del espacio-tiempo.

Es importante valorar si se diferencia entre postulados, con una relevancia manifiesta del primero, o por el contrario si se priman a las deducciones más habituales que se derivan los postulados.

De nuestras hipótesis operativas (S2-H2;H3) se deduce que se consideran correctas y contrarias a las mismas: La mención expresa del principio de relatividad y la invarianza de las leyes físicas. No se considerarían como correctas la simple mención a las transformación de Lorentz o indicaciones sobre duraciones y contracciones, masa dependiente de la velocidad...

2.2 Señala aplicaciones tanto teóricas como prácticas de la relatividad

Esta cuestión abierta, complementa la cuestión anterior e indaga acerca de las facetas teóricas y prácticas derivadas de los postulados y que pudieran parecer relevantes al profesor: dilataciones, contracciones, aplicaciones en física nuclear y de partículas, magnetismo y relatividad, spin ....

En nuestra hipótesis (S2-H2;H4) el profesor otorgará más importancia al aparato matemático de la transformación de Lorentz que a una comprensión de los fenómenos y a las ideas de los alumnos. Les será dificultoso citar aplicaciones prácticas y teóricas de la Teoría de la Relatividad.

2.3 La ecuación  $E=mc^2$  es una de las más conocidas y divulgadas. Cómo la explicarías a los alumnos para intentar que capten su significado

Este ítem abierto indaga acerca de a) si se dan propuestas de conversión masa energía, en la línea del análisis ya realizado en el ítem análogo de textos. b) Si plantea la ecuación como una relación masa-energía en la línea de la  $m_r$ . c) Si usa de  $c^2$  de forma análoga al papel de la densidad en la relación entre la masa y el volumen; o si, por el contrario, le dan un sustrato físico de equivalencia

Nuestra hipótesis operativa (S2-H4) es que los profesores realizan propuestas incorrectas de conversión y usan con frecuencia de la masa relativista  $m_r$ .

2.4 Valora de 0 a 10 tu grado de acuerdo con las siguientes frases (0 totalmente en desacuerdo, 10 acuerdo total).

- Se puede prescindir de su conocimiento, en la enseñanza secundaria.
- La teoría necesita un alto nivel para comprenderla los rasgos principales
- Está poco conectada con el resto de la física estudiada en el bachillerato
- Las fórmulas son complicadas y no ayudan a comprender lo esencial

El tiempo que destinarías a este tema en 2º bachillerato sería de:\_\_\_\_\_

El ítem pretende revisar las expectativas del profesor frente a la enseñanza del tema. Nuestras hipótesis operativas es que los profesores le dedican poco tiempo, sus expectativas respecto a su comprensión por los estudiantes son escasas y no valoran demasiado su papel en el curriculum del bachillerato,(S2-H5)

Son favorables a esta interpretación las altas puntuaciones en respuestas a las cuestiones a) b) c) e), y el tiempo inferior a 10 clases.

**3.3.3 Relación entre las subhipótesis operativas y los ítems del cuestionario de profesores.**

	<b>Síbh hipótesis operativas</b>	<b>Ítems</b>
1	Los profesores mantendrán ideas epistemológicas simples y distorsionadas sobre el surgimiento de la Teoría de la Relatividad	1.1
2	No tendrán en cuenta las ideas previas de los alumnos.	2.1;2.2
3	No resaltarán adecuadamente el estatus de la teoría en el marco de la Física	1.1;2.1
4	No mostrarán una visión actualizada de la masa en la Teoría de la Relatividad y la relación masa-energía no recibirá un tratamiento exento de errores	2.2;2.3
5	Los profesores no valorarán el estudio de la TER en la secundaria y le atribuirán una alta dificultad, además le dedicarán poco tiempo.	2.4

**3.4 DISEÑO PARA CONTRASTAR LA SUBHIPÓTESIS TERCERA**

Algunas preconcepciones pueden evidenciarse con un cuestionario inicial sencillo, En términos generales es de esperar que los modelos y apreciaciones de los alumnos hayan evolucionado desde una explicación de los fenómenos limitada por la percepción y basada en el sentido común hacia una visión más abstracta y próxima al modelo newtoniano.

La clave desde la perspectiva de la transición hacia la cosmovisión relativista es si se han tenido en cuenta, o no, en la enseñanza-aprendizaje que va posibilitando esta evolución conceptual, el desarrollo de conectores que faciliten el cambio.

**3.4.1 Cuestionarios destinado a alumnos de primer nivel:**

CUESTIONARIO PARA ALUMNOS DE 4º DE ESO:

1	Expón las ideas que tengas sobre el espacio. ¿Qué es el espacio?
2	Expón las ideas que tengas sobre el tiempo.
3	¿Qué son los sistemas de referencia? ¿Para qué sirven?.
4	¿Existen sistemas de referencia que estén totalmente quietos, en reposo absoluto? ¿Cuáles?
5	Un aviador lanza un paquete. ¿ Hay alguna diferencia entre la trayectoria que sigue vista desde el suelo y desde el avión?. ¿Cuál? ¿Alguna es más valida que otra?

COMPLEMENTO PARA ALUMNOS DE 1º DE BACHILLERATO

6	<p>En una nave espacial en movimiento un astronauta lanza un objeto hacia delante con velocidad (<math>V_o</math>) respecto a él. Nosotros desde fuera estudiamos velocidades. La nave se mueve respecto a nosotros con velocidad (<math>V_n</math>).</p> <p>a) La velocidad con que se mueve el objeto respecto a nosotros es:</p> <p>b) Y si se lanzara en dirección perpendicular al movimiento de la nave sería</p> <p>c) Y si es un rayo de luz emitido hacia adelante, en el vacío con <math>V_{Luz}</math></p>	<table border="1" style="width: 100%; height: 100%;"> <tr><td style="text-align: center;">=</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">=</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">=</td></tr> </table>	=	=	=
=					
=					
=					
7	<p>Indica si la mecánica que surgió tras los trabajos de Galileo, Newton, etc. tiene límites en su validez, o es exacta en toda circunstancia</p>				

**3.4.2 Comentarios de los cuestionarios de alumnos primer nivel. Criterios de valoración de los ítems.**

4º ESO Y 1º DE BACHILLERATO

1	<p>Expón las ideas que tengas sobre el espacio. ¿Qué es el espacio?</p>
---	---

El espacio que se considera en la mecánica clásica es un espacio real, euclídeo, tridimensional. Se asemeja a un contenedor, escenario de los fenómenos, pasivo, que no interacciona con ellos. Esta concepción del espacio si bien es la más corrientemente aceptada, como en consonancia con la perspectiva newtoniana, dista de ser la única propuesta, y en la historia de la física se ha dado un rico debate sobre diversos modelos

El espacio desde esta perspectiva newtoniana posee unos atributos, propiedades, que siguiendo la recopilación de Doménech (basada en Gondhaller 1980) son:

. **El espacio es completo:** Carece de límites, o puntos singulares independientemente de cualquier materia que contenga.

. **El espacio es homogéneo:** Todos los puntos son equivalentes, y en ellos las leyes físicas son iguales, ningún experimento mecánico distinguirá un punto de otro.

. **El espacio es continuo:** Entre dos puntos cabe siempre situar un tercero, es decir posee las propiedades matemáticas del continuo.

. **El espacio es isótropo:** No hay direcciones privilegiadas en el espacio.

. **La distancia es un invariante:** la separación entre sucesos independientes simultáneos no cambia en el espacio y el tiempo.

. **El espacio es euclídeo:** El espacio satisface las propiedades de la geometría euclídea

. **El espacio es pasivo:** No se ve afectado por la materia, ni esta por aquel, sea cual sea su estado, posición o movimiento.

. **El espacio es independiente del tiempo.**

Se espera que el alumno manifieste una imagen muy clásica (incluso euclidiana) del espacio como un recipiente inmutable tridimensional donde tienen lugar los fenómenos físicos. No dirán nada sobre sus propiedades de homogeneidad e isotropía. Estas apreciaciones son las que consideraremos favorable a nuestra hipótesis. (S3.1)

2

Expón las ideas que tengas sobre el tiempo.

El tiempo psicológico está asociado a la conciencia del cambio, a la sucesión de los eventos y su duración. Una concepción social del tiempo está ligada a fenómenos naturales periódicos o al funcionamiento de mecanismos artificiales periódicos o convencionales.

Esta definición es insuficiente desde la lógica, en tanto que cualquier reloj, está basado en esencia en un movimiento de referencia, no cabe definir el tiempo como un concepto primario usando un concepto secundario como el de movimiento. Sirva como ejemplo la utilización de la primera ley de Newton, por ejemplo en Leemann (1998) para construir relojes, para explorar el concepto de tiempo y su relación con el espacio, la idea es que el concepto de tiempo va asociado al de cambio y que el movimiento de un punto libre, sometido a la ley de la inercia, asocia unívocamente los intervalos de tiempo y el espacio.

Un tercer plano de abstracción lo constituirán las nociones axiomáticas del tiempo absoluto newtoniano. El evidenciado en la *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* de Newton con su “*tiempo absoluto, verdadero y matemático que discurre homogénea e igualmente por su propia naturaleza con independencia de los agentes externos...*”

Una concepción más coherente desde el punto de vista lógico que excluya los inconvenientes de la definición anterior (por ejemplo homogénea e igualmente...), sería la que ligase el tiempo a un parámetro real.

El problema se abriría ahora a la elección de un tiempo en un origen de SR y los problemas conocidos de los diferentes de los observadores los conceptos de simultaneidad y sincronización.

Desde el punto de vista clásico, coherente lógicamente con la formulación matemática, el tiempo es un parámetro real, monótonamente creciente. al que de forma análoga al caso del espacio podemos caracterizar por sus propiedades clásicas. Siguiendo a los mismos autores ya citados en el estudio del espacio podemos concluir:

. **El tiempo es continuo:** Para un tiempo siempre es posible encontrar o establecer otro lo cercano que queramos.

. **El tiempo es homogéneo:** Cualquier tiempo es equivalente a cualquier otro, cualesquiera de las leyes de la física son idénticas en dos tiempos diferentes.

. **El tiempo es isótropo:** No hay un sentido privilegiado del tiempo en la microfísica, las leyes son matemáticamente reversibles en el tiempo. El aspecto concerniente a la irreversibilidad macroscópica de los procesos es, en principio, un problema asociado a la configuración inicial de los sistemas, y a las leyes de evolución probabilísticas a las que se llega por aplicación de las leyes de la física, de ello surge la noción de entropía y el segundo principio de la termodinámica.

. **El tiempo es universal:** Para todos los SRI el tiempo transcurre de la misma manera, los intervalos temporales son iguales ( $\Delta t = \Delta t'$ ) y una vez sincronizados ( $t_0 = t_0'$ ) atribuyen a cualquier suceso el mismo valor de tiempo ( $t = t'$ ), aunque le atribuyan coordenadas espaciales diferentes. Como corolarios, se puede afirmar que la simultaneidad es un concepto universal, lo que es simultáneo en un sistema lo es en cualquier otro.

. **El tiempo es pasivo:** El tiempo es independiente de la materia y no interactúa con ella.

En cuanto a la relación que mantiene con el espacio la visión clásica es la de una independencia total con el espacio.

Es de esperar que de una forma más o menos clara se aproximen los alumnos parcialmente a esta concepción. Se considera como respuestas favorables a nuestra hipótesis (S3.1) aquellas que tracen una imagen del tiempo como duración que transcurre de modo uniforme para distintos observadores (puede que expresado con cierta confusión). Posiblemente relacionen el tiempo con lo que marca el reloj, o con movimientos periódicos, sin pensar que incurren en un círculo vicioso (definir el t a partir del movimiento o viceversa).

3

Qué son los sistemas de referencia ¿Para qué sirven?.

Es de esperar que los alumnos manejen la noción de sistema de referencia cartesiano, como 3 ejes que se cortan en el origen, olvidando que

también hace falta un origen de tiempos, dado que se trata de sistemas de referencia espacio-temporales. Por tanto, servirán para definir la posición y el desplazamiento, olvidando que estos se definen en un instante determinado.

Son favorables a nuestras hipótesis (S3.2) estas menciones. Por el contrario sería indicativo de una comprensión más profunda, señal de un proceso de enseñanza-aprendizaje más significativo, la mención a diversos sistemas de referencia, a su validez, relaciones entre ellos...

4      ¿Existen sistemas de referencia que estén totalmente quietos, en reposo absoluto? ¿Cuáles?

Las dificultades que entraña una cuestión aparentemente simple como esta es considerable. Valga para ilustrarlas la siguiente cita de Hierrezuelo (1989).

*“Aunque el alumno admite la existencia de varios sistemas de referencia, para él, generalmente sigue existiendo un movimiento verdadero. Esto le plantea dificultades en el cálculo de velocidades relativas, que en muchas ocasiones no son vistas como verdaderas velocidades.... El adquirir la idea clara de la dependencia de un movimiento del sistema de referencia elegido es un proceso difícil,...Será necesario pues plantearlo como un objetivo a conseguir a lo largo de varios años, incluyendo en todos los cursos actividades de complejidad creciente”.*

La noción clásica es la que esperamos que maneje el estudiante, el tipo de respuestas conformes a nuestra hipótesis, son las que usen de un sistema de referencia absoluto pero que difícilmente podrá ubicar. Pueden considerar como tales las estrellas fijas, el propio espacio, etc.

5      Un aviador lanza un paquete. ¿ Hay alguna diferencia entre la trayectoria que sigue vista desde el suelo y desde el avión?. ¿Cuál? ¿Alguna es más valida que otra?

La cuestión insiste y profundiza en la cuestión anterior, solicitando un uso funcional de las ideas, e insistiendo de nuevo respecto de la dificultad de este tipo de cuestiones, podemos citar a Viennont en su clásico trabajo *Le rasoinement spontané en dynamique élémentaire* en el cual pone de manifiesto las dificultades que encuentran los estudiantes, incluso de nivel universitario, de interpretar movimientos usando distintos sistemas de referencia.

Son favorables a nuestra hipótesis(S3.H2) las apreciaciones a favor de un movimiento absoluto y una trayectoria privilegiada

**ESTUDIO DE CUESTIONES ADICIONALES PARA ALUMNOS DE 1º DE BACHILLERATO.**

6	<p>En una nave espacial en movimiento un astronauta lanza un objeto hacia delante con velocidad (<math>V_o</math>) respecto a él. Nosotros desde fuera estudiamos velocidades. La nave se mueve respecto a nosotros con velocidad (<math>V_n</math>).</p> <p>a) La velocidad con que se mueve el objeto respecto a nosotros es:</p> <p>b) Y si se lanzara en dirección perpendicular al movimiento de la nave sería</p> <p>c) Y si es un rayo de luz emitido hacia adelante, en el vacío con <math>V_{LUZ}</math></p>	<table border="1" style="width: 100%; height: 100%;"> <tr><td style="text-align: center;">=</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">=</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">=</td></tr> </table>	=	=	=
=					
=					
=					

Es necesario para los estudiantes de este nivel el dominio del principio de relatividad galileano en su faceta más práctica, además de la reflexión de su base teórica. La cuestión explora la composición de velocidades y el manejo en situaciones asimétricas. Por otra parte se incide acerca del manejo de la velocidad de la luz, abriendo paso a la pregunta de si en el estudio de la óptica se estableció alguna salvedad acerca de la velocidad de la luz para distintos SR., problema importantísimo de relevancia lógica e histórica.

Precisamente a los alumnos les cuesta trabajo imaginar la velocidad de la luz, tanto es así que la tendencia espontánea es atribuirle una velocidad instantánea (Hierrezuelo, 1993)

En suma, consideramos como favorable a nuestra hipótesis (S3.2) acerca de la respuesta errónea a la cuestión c y b. Y la correcta al apartado a.

7	<p>Indica si la mecánica que surgió tras los trabajos de Galileo, Newton, etc. tiene límites en su validez, o es exacta en toda circunstancia</p>
---	---

La cuestión incide en los fundamentos epistemológicos y lógicos con que se presenta el conocimiento físico. ¿Se presenta de una forma dinámica y no dogmática la génesis de la física newtoniana? ¿Se plantean expresamente sus límites o dificultades? Estas preguntas son importantes en tanto contribuyen a formar el estatus lógico de la teoría y lanza un conector para la enseñanza de la relatividad

Es favorable a nuestra hipótesis (S3.1) la afirmación plena de su exactitud, con independencia de circunstancias, y sin restricciones a la validez de la mecánica clásica.

### 3.4.3 Cuestionario para alumnos de 2º bachiller

Siendo este el cuestionario clave en cuanto a la asimilación de los conceptos clave, conviene intentar recoger los aspectos clave:

- Aspectos epistemológicos e históricos: Papel de la experimentación, la resistencia al cambio, el impacto social.
- Aspectos lógicos: Ubicación en el marco de la Física con especial atención al dominio de los principios y postulados: Principio de relatividad, ideas acerca de la propagación de la luz, velocidad y frecuencia.
- Aspectos claves, consecuencias: Ideas acerca del espacio, longitud, conexión con ideas mantenidas en otros tiempos, ideas acerca del tiempo, de la percepción de los fenómenos vs medida., el manejo de la composición de velocidades, variación de la medición de magnitudes con la velocidad, etc.
- Acerca de la energía y la masa: sobre la validez de las expresiones clásicas, aplicaciones en el ámbito de la física nuclear, aplicaciones en el ámbito de la física de partículas.
- Aspectos referidos a la enseñanza aprendizaje.

Ante la dificultad de un barrido sistemático de estos aspectos, se ha intentado usar de aquellos que ofrecían un mayor poder de contrastación de la hipótesis y que al mismo tiempo sean suficientemente significativos. Se ha combinado ítems abiertos, que permitieran registrar la evolución conceptual tras el proceso de enseñanza, con otros más directos que precisen las ideas que el alumno posee.

#### CUESTIONARIO PARA ALUMNOS DE 2º DE BACHILLERATO

1	Expón las ideas que tengas sobre el espacio. ¿Qué es el espacio?.
2	Expón las ideas que tengas sobre el tiempo.
3	¿Qué son los sistemas de referencia? Existen sistemas de referencia que estén totalmente quietos, en reposo absoluto ¿Cuáles?
4	Indica, a modo de resumen, los que consideres puntos esenciales en la Relatividad.

5	<p>Como se sabe en muchos fenómenos típicos de la relatividad está involucrado el tiempo. Valora este caso:</p> <p><i>Dos pilas de reloj idénticas se conectan al cruzar un cohete con una alta velocidad (<math>0,6c</math>) por delante de una estación espacial, una en el cohete y otra en la estación. El piloto cronometra en su reloj el tiempo que tarda en consumirse la pila y comunica su resultado por radio a la estación. El valor comunicado será.</i></p> <p>a) igual al obtenido con la pila en la estación b) mayor c) menor d) depende</p> <p>COMENTA:</p>
6	<p>Una de las ideas importantes que se derivan de la TER es la que afecta a la medida de la longitud de cuerpos en movimiento. Estudia el siguiente caso:</p> <p><i>Una cruz tiene brazos iguales en un sistema de referencia en el cual está en reposo. Y se le evalúa su forma, tal y como se mide al pasar a una velocidad próxima a <math>c</math> ¿Señala cual, o cuáles, de los siguientes resultados son correctos?</i></p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">    </div> <p>a) se acerca con veloc <math>V</math>    b) se aleja con <math>V</math>    c) se acerca con <math>V</math>  d) ninguna (dibújala)</p> <p>COMENTA:</p>
7	<p>Las fórmulas pueden ser difíciles, uno de los trucos que se utiliza a veces es aprovechar las ecuaciones conocidas de la mecánica sustituyendo <math>m</math> por <math>m_0 / (1 - v^2/c^2)^{-1/2}</math>. ¿ Es, en tu opinión, una buena estrategia, o puede llevar a error en algún caso?</p>
8	<p>La ecuación <math>E=mc^2</math> es una de las más conocidas. ¿Cuál es su significado?.</p>
9	<p>Cuando un núcleo de Uranio 235 se rompe en dos o más fragmentos se libera una energía de 200 MeV por fisión. Explica este hecho.</p>

**3.4.4 Comentarios de los cuestionarios de ALUMNOS 2º de bachillerato . Criterios de valoración de los ítems.**

1	Expón las ideas que tengas sobre el espacio. ¿Qué es el espacio?.
---	---

Ya se ha estudiado este punto en el caso de alumnos de un primer nivel, conviene ahora poner de manifiesto la evolución que se ha originado tras el

estudio del tema, pues si hay un tópico en la enseñanza de la relatividad es el hecho de que supone una visión nueva del espacio y el tiempo. Pero, ¿la nueva visión se ha incorporado significativamente al alumno. En qué consiste esa nueva visión?. De hecho en muchos tratamientos y enfoques, aparentemente ya pasados por el nuevo tamiz relativista asoma el espacio absoluto subyacente. Lo que se pretende con este ítem es averiguar en que sentido la noción del espacio se ha modificado, para ello se expone a continuación que aspectos se pueden considerar como claves:

*Todos los movimientos son relativos.* No existe ni un espacio en reposo, ni un origen preferente ni un movimiento real y otros aparentes. Todos son igualmente reales.

*No existe un único espacio universal, como tampoco existe un tiempo universal,* sino tantos espacios como SRI se puedan construir, del mismo modo que los tiempos locales a cada SRI son reales y no convencionales. *Los intervalos espaciales tienen distinta longitud en distintos SRI,* por ejemplo, la longitud de un objeto, o la distancia entre dos sucesos. Pero las distintas distancias no son arbitrarias, están vinculadas unívocamente por ecuaciones de transformación: *El espacio y el tiempo no son independientes.*

Por supuesto que no se debe esperar un aprendizaje profundo de estos conceptos a este nivel. Sin embargo cabe fijar unas capacidades críticas para considerar la evolución conceptual del estudiante. De acuerdo a nuestra hipótesis operativa (S3-H1;H2) los alumnos mostrarán unas ideas no relativistas de los conceptos de espacio. Se considera un aprendizaje significativo aquel que en este nivel enuncia al menos algunas características como por ejemplo la variación de las mediciones entre los distintos sistemas de referencia.

2	Expón las ideas que tengas sobre el tiempo.
---	---

La contestación a esta pregunta, pretende, en esencia, es estudiar si se ha producido una cierta evolución conceptual tras el estudio del tema. Los aspectos clave para los cuales se debería haber producido una progresión para poder considerar el aprendizaje significativo son:

*La ruptura del carácter universal del tiempo.* No hay un tiempo sino tiempos, tantos como SRI podemos establecer.

El concepto de simultaneidad de fenómenos separados espacialmente es relativo, no absoluto (lo que vincula espacio y tiempo, no son independientes).

La *duración* de los fenómenos observados por diferentes observadores son *distintos*, pero no existe un tiempo real o prioritario, *todos son igualmente reales.* Pero los distintos tiempos no son arbitrarios, están vinculados férreamente por ecuaciones de transformación.

Las relaciones de orden de los fenómenos acaecidos o sobre un objeto (o un punto y sus transformaciones en los distintos SRI) son iguales para todos los SR, lo que preserva las relaciones de causalidad.

De acuerdo a nuestra hipótesis operativa (S3-H1; H2) contrarias a nuestra hipótesis la mención relevante de alguna de estas facetas no clásicas del tiempo.

3 ¿Qué son los sistemas de referencia? Existen sistemas de referencia que estén totalmente quietos, en reposo absoluto ¿Cuáles?

La cuestión insiste de nuevo en la clarificación de los conceptos básicos. Indaga si el alumno asume la existencia de una componente espacial y otra temporal en los sistemas de referencia, si vincula el SR. a la presencia de un observador como protagonista y, por último, si asume la inexistencia de un espacio absoluto y la imposibilidad de manejar en Física más que movimientos relativos.

La hipótesis operativa (S3; H2) supone que los alumnos no manejarán adecuadamente las nociones de SR, SRI. Se considera correctas y contrarias a nuestra hipótesis la mención del punto a) y de al menos uno de los otros tres.

4 Indica, a modo de resumen, los que consideres puntos esenciales en la Relatividad.

Esta cuestión, presentada de forma abierta, intenta precisar qué ideas son las que presentan una mayor relevancia en el esquema conceptual del alumno. En especial interesa destacar si se le atribuye importancia a los aspectos más profundos, los postulados o por el contrario son los más paradójicos los que le merecen una mayor atención.

En nuestra hipótesis operativa (S3-H3;), los alumnos no asumirán una visión correcta de la importancia de la TER en el conjunto de la Física, y otorgará más importancia al aparato matemático de la transformación de Lorentz, o a las consecuencias más “chocantes” que a una comprensión de los fenómenos y las ideas básicas. Le será difícil citar aplicaciones prácticas y teóricas de la Teoría de la Relatividad.

Se consideran correctas y contrarias a las hipótesis: La mención expresa del principio de relatividad y la invarianza de las leyes físicas, la inexistencia de SR. absolutos. No se considerarían como correctas la simple mención a las transformación de Lorentz o indicaciones sobre duraciones y contracciones, masa dependiente de la velocidad...

- 5 Como se sabe en muchos fenómenos típicos de la relatividad está involucrado el tiempo. Valora este caso:

*Dos pilas de reloj idénticas se conectan al cruzar un cohete con una alta velocidad ( $0,6c$ ) por delante de una estación espacial, una en el cohete y otra en la estación. El piloto cronometra en su reloj el tiempo que tarda en consumirse la pila y comunica su resultado por radio a la estación. El valor comunicado será.*

- a) igual al obtenido con la pila en la estación b) mayor c) menor d) depende  
COMENTA:

Este ítem explora la aplicación práctica del concepto de tiempo propio. En este caso hay que distinguir entre el tiempo propio, medido y comunicado desde el cohete y el tiempo de duración de la pila del cohete evaluado desde la estación. El estudiante ha de considerar ambos sistemas en pie de igualdad, no hay ninguno cuyas mediciones sean preferentes, las mediciones realizadas en ambos sistemas de un fenómeno análogo, en este caso la duración de una pila, ha de dar lugar al mismo valor y la comunicación de resultados ha de coincidir. No se debe confundir esto con la evaluación del mismo suceso desde distintos SRI en ese caso para uno de ellos, aquel en que el evento se realiza en una posición fija, la duración del mismo es mínima, el llamado tiempo propio. Por ejemplo desde el sistema estación la medición de la duración de la pila del cohete proporciona un valor mayor que la de la pila fija en la estación.

En consonancia con nuestra hipótesis operativa (S3- H2), los alumnos encontrarán a su vez, dificultades en resolver cuestiones relacionadas con tiempos en situaciones no estándar; y en especial en situaciones donde se exija una comprensión de la simetría profunda entre los SR.

Se considera correcta, y contraria a nuestra hipótesis, la ejecución correcta del ítem, es decir la opción a) y comentarios acordes.

- 6 Una de las ideas importantes que se derivan de la TER es la que afecta a la medida de la longitud de cuerpos en movimiento. Estudia el siguiente caso:

*Una cruz tiene brazos iguales en un sistema de referencia en el cual está en reposo. Y se le evalúa su forma, tal y como se mide al pasar a una velocidad próxima a  $c$  ¿Señala cual, o cuáles, de los siguientes resultados son correctos?*



- a) se acerca con veloc.  $V$  b) se aleja con  $V$  c) se acerca con  $V$   
d) ninguna (dibújala)

COMENTA:

Este ítem explora la aplicación práctica de la contracción relativista, y su simetría axial, a un caso de un cuerpo material. Se juega también con el signo de la velocidad acercamiento/alejamiento del cuerpo.

Nuestra hipótesis operativa (S3-H1) conduce a pensar que los alumnos encuentran dificultades en aplicar las ideas relativistas a situaciones no estándar. Aunque se manejen exactamente las mismas ideas que se han ejemplificado en el aprendizaje.

Se consideran correcta y contraria a nuestra hipótesis. la ejecución correcta del ítem, es decir la opción b), y comentarios en consonancia.

7 Las fórmulas pueden ser difíciles, uno de los trucos que se utiliza a veces es aprovechar las ecuaciones conocidas de la mecánica sustituyendo  $m$  por  $m_0 / (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ . ¿ Es, en tu opinión, una buena estrategia, o puede llevar a error en algún caso?

Esta puede ser una fuente de error corriente al extender abusivamente las expresiones clásicas. Un conocimiento crítico de las principales relaciones y su origen desaconsejan rotundamente este camino.

Se consideran correctas y contrarias a nuestra hipótesis (S3- H1;H2) El rechazo de la estrategia y la formulación correcta de las expresiones. Valorando positivamente la sustitución de  $F= m.a$  por  $dp/dt$

8 La ecuación  $E=mc^2$  es una de las más conocidas. ¿Cuál es su significado?.

Este ítem abierto es esencialmente análogo al usado para los profesores.

La hipótesis operativa (S3-H4) será apoyada si los alumnos realizan propuestas incorrectas de conversión y abundan en el uso de la  $m_r$ , etc.

9 Cuando un núcleo de Uranio 235 se rompe en dos o más fragmentos se libera una energía de 200 MeV por fisión. Explica este hecho.

La explicación de este problema insiste en la línea de la cuestión anterior, forzando la concreción de las ideas en una importante aplicación práctica.

Se incide de nuevo en la hipótesis operativas (S3-H4) y nos mostrará si identifica correctamente la diferencia conceptual entre la suma de la masa en reposo de las partículas y la masa del sistema, si se dan propuestas de conversión masa energía, si el alumno asigna energía a los restos nucleares... y como se compatibiliza con el manejo o no de la  $m_r$ .

Nuestra hipótesis operativa es que el estudiante realiza propuestas incorrectas de conversión y no precisa ni el origen ni asigna correctamente la energía liberada en el proceso a los distintos componentes del sistema.

### 3.4.5 Relación entre las subhipótesis operativas y los ítems del cuestionario de alumnos.

Subhipótesis operativas		Items	
		1 <sup>r</sup> nivel	2 <sup>o</sup> nivel
<b>1</b>	Mostrarán ideas prerrelativistas, (Newtonianas ingenuas, o incluso alternativas, en los niveles inferiores) en el manejo de los conceptos básicos de espacio y tiempo.		<b>1,2,5</b>
		1,2,7	<b>6,7</b>
<b>2</b>	No manejarán adecuadamente las nociones de SR, SRI, y el principio de relatividad (clasico-TER).	3,4,5,6	<b>3</b>
<b>3</b>	No asumirán una visión correcta de lo esencial de la TER en el marco de la física.		<b>4</b>
<b>4</b>	No mostrarán una visión actualizada de la masa en la Teoría de la Relatividad y no se manejará la relación masa-energía de un modo exento de errores		<b>8-9</b>



## 4 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

La contrastación de la primera hipótesis se ha realizado mediante la aplicación de los instrumentos diseñados en el capítulo precedente. Los diseños se referían específicamente a los libros de texto, profesores y alumnos. En el caso de los textos, se ha analizado la forma en que se presentan los conceptos de espacio y tiempo así como los fundamentos de la teoría de la relatividad especial en el de bachillerato y en los niveles precedentes. El diseño sobre los profesores indagaba en el modo en que introducen los conceptos y, por último, el de los estudiantes, la naturaleza del aprendizaje efectuado por los alumnos y el punto de partida con que se acercan al proceso de enseñanza aprendizaje.

Es de destacar que, en esta primera fase del trabajo, se han manejado muestras pequeñas. En el caso de los libros, porque el número de textos del nuevo bachillerato LOGSE es muy reducido y, de hecho, la muestra de 2º de bachillerato es sumamente significativa pues se han estudiado la práctica totalidad de los más difundidos y usados en todas las comunidades. En el caso de los profesores porque es muy difícil conseguir muestras numerosas. En el caso de los alumnos, si bien su número no es muy alto, se sabe que el tamaño de la muestra no es un factor esencial y a menudo se señala que la riqueza del diseño la adecuación a la hipótesis y la coherencia cruzada de los resultados es más importante que el tamaño.

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos al aplicar los instrumentos indicados y se analizarán los mismos.

### 4.1 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CONTRASTACIÓN DE LA SUBHIPÓTESIS PRIMERA

La revisión ha usado de 30 libros de reciente edición puesto que se trata de los nuevos niveles diseñados en la LOGSE:

Libros de primer nivel	4º ESO	7 libros
	1º Bachillerato	12 libros
Libros de segundo nivel:	2º de bachillerato	11 libros

Los resultados se presentan a continuación, en forma de porcentaje (%) de respuestas afirmativas a la cuestión, tal y como se formula, y la desviación estándar (s.d) de cada ítem del cuestionario. En el análisis de las respuestas se analizan estos porcentajes en razón de si resultan, o no, y en que grado favorables a la hipótesis operativa.

1. **4º ESO Y 1º BACHILLERATO**

	%Sí	Sd
1.1 ¿Se presenta de una forma dinámica y no dogmática la génesis de la física Newtoniana?.	63	11
¿Se plantean expresamente sus límites de validez?	32	11

En todos los textos de 1º de bachillerato se incluye, por imperativo normativo, aspectos correspondientes a técnicas de trabajo científico, nociones acerca de la ciencia y su construcción, así como referencias a su evolución histórica y epistemológica. Es por ese motivo por lo que se presentan porcentajes relativamente elevados (63%) de introducciones de la dinámica enmarcadas en un proceso histórico-científico de desarrollo; más bien sería destacable reflexionar por qué no se da este hecho en la generalidad de los textos (no ocurre en el 37% de ellos, porcentaje de casos directamente favorable a nuestra hipótesis). Entre los que sí lo hacen, cabe indagar en la calidad de sus planteamientos, en los que a menudo una vez introducidos los conceptos rehuyen aspectos claves tales como enmarcarlos en un campo de validez, o apuntar líneas hacia una ulterior superación.

Es de destacar que la visión que, algunos textos, presentan acerca de lo que es la ciencia, y el trabajo científico adolece de distorsiones y simplificaciones importantes que en modo alguno favorecen una visión correcta de la ciencia. Por ejemplo en un texto (Everest) se establece el método científico como un conjunto de etapas: Observación, experimentación, obtención de leyes, formulación de hipótesis y teorías, deducción y aplicación a situaciones futuras), de manera similar se expresa en otros libros (por ejemplo, Eurema1); soslayando estos aspectos por cuanto no son el objeto principal de este trabajo, retengamos la idea de que conviene afinar en la valoración de este ítem por cuanto lo indicado presupone acerca de la visión que del proceso científico mantienen los autores de los manuales.

Se ha usado un criterio amplio en la presentación de la física newtoniana, aceptando como válidos casos (incluidos en ese 67%) de varios textos, que incluyen lecturas más o menos extensas acerca de las aportaciones de Galileo y Newton. Sin embargo, se echa en falta en la práctica totalidad de los textos una estrategia sistemática de planteamiento de situaciones problemáticas y construcción de conocimiento. En general, predomina en los diferentes textos la presentación del conocimiento científico de un modo ahistórico y acabado. Tampoco se incide de modo generalizado en los aspectos de crisis y cambio de paradigma, aspectos estos de sumo interés para los propósitos de esta investigación.

En consonancia con la presentación que se hace, el apunte de insuficiencias, limitaciones o campos de validez de lo presentado es mínimo. Tan sólo en dos de los manuales merece un epígrafe con este título (Galindo y otros de Ed. Mc Graw Hill, Ed. Everest). En otros dos casos aparece de forma

episódica, y sin profundizar, menciones acerca de la existencia de limitaciones de la mecánica clásica. En algún texto se introducen incluso aspectos tales como la  $m_r$ , posición que parece muy prematura en ese nivel, objeto de debate tal y como se ha expuesto, y que no se suscribe en este trabajo.

En términos generales los textos de 4º de ESO prestan una mayor atención que los de bachillerato a los aspectos históricos y a la construcción de un discurso epistemológico. Se indaga en un 60% de los textos al nacimiento de la cinemática y la Dinámica, sin embargo no se comenta prácticamente nada una vez mostradas las aportaciones de Newton, ni se fijan límites de validez o se señala su posterior superación más que en un pequeño número de casos (por ejemplo en Ed. Tabarca, Edelvives).

1.2 ¿Se indagan, aún brevemente, los presupuestos de las concepciones Newtonianas del espacio y el tiempo?	%Sí 37	Sd 11
--	-----------	----------

Un porcentaje tan exiguo es muestra de la escasa atención que reciben los aspectos cualitativos de los conceptos básicos, (63% favorable a nuestra hipótesis de escasa atención) teniendo en cuenta además la amplitud con que se ha considera afirmativa la respuesta. Un análisis suficiente, y adaptado a un nivel de iniciación, tan solo se encuentra en cuatro de los textos de bachillerato; en ellos se plantea el concepto de suceso con su componente espacial y temporal. Aunque en sólo un caso se explicitan algunos atributos de los conceptos de espacio y tiempo, por ejemplo la isotropía, el carácter euclídeo etc., estos están más o menos implícitos en el análisis que realizan.

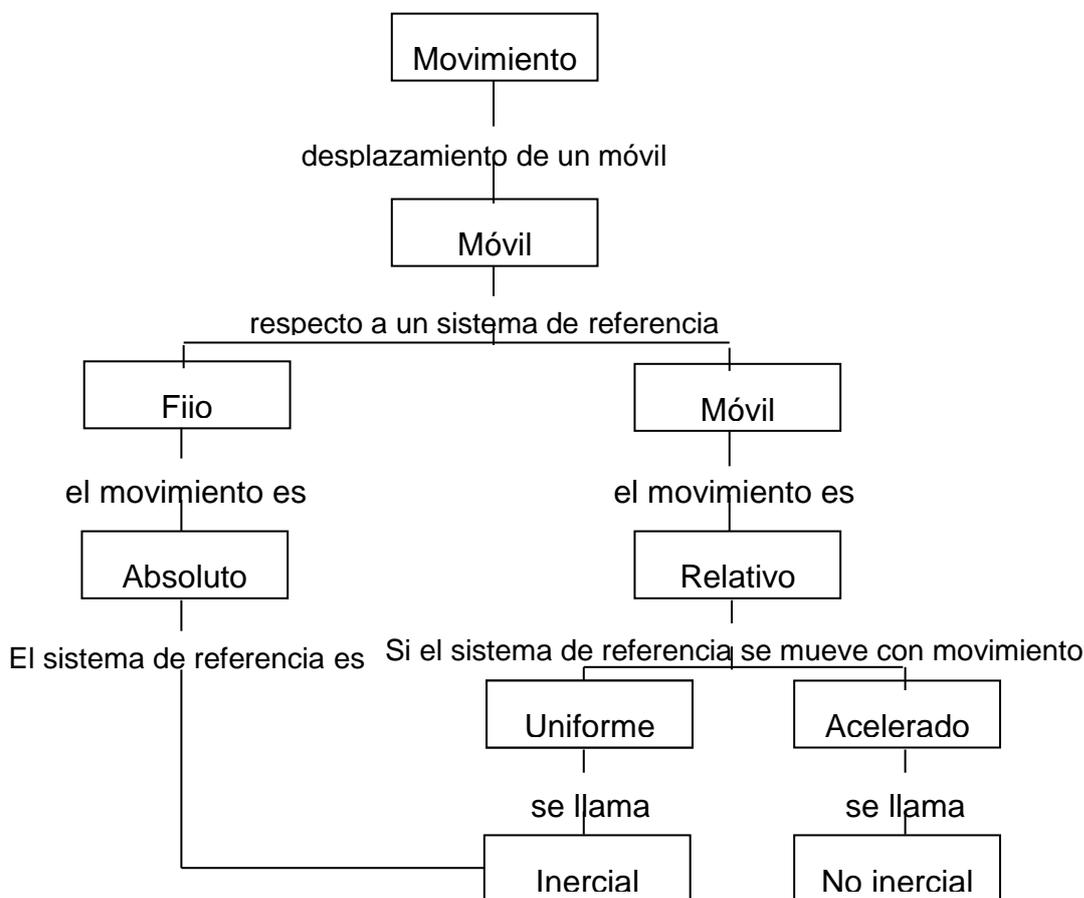
Nociones básicas acerca del espacio y el movimiento se estudian, en todos los textos, en el capítulo de cinemática y en el planteamiento del problema del movimiento. Casi todos los libros plantean el carácter relativo del movimiento e introducen el concepto de sistema de referencia inercial, pero sin una clarificación suficiente que lo hace de difícil comprensión lógica para los estudiantes.

Las afirmaciones en torno al movimiento absoluto y relativo son muchas veces ambiguas en cuanto a la existencia de este. Por ejemplo (Everest):

*“En la actualidad se considera imposible encontrar un sistema de referencia absolutamente fijo, por lo que no podemos hablar de **movimiento absoluto**, sino de **movimiento relativo**”.*

La literalidad de la afirmación sería suscrita tal cual por el propio Newton (de hecho esta era su posición), si se pretendía cuestionar el espacio absoluto no se hace en modo alguno en tanto que se da por existente. De modo análogo se maneja en otros (por ejemplo en el de la editorial Anaya).

En otros textos, no se le cuestiona suficientemente, hasta el punto de que se le incluye expresamente, reforzando la idea de espacio absoluto con mapas conceptuales como el siguiente (Ed. Bruño):



Este mapa no sólo es poco claro sino que no se establece salvaguarda acerca del concepto de movimiento absoluto, que se da como normal.

En la generalidad de los textos el concepto de espacio como ente abstracto, y con personalidad definida, no suele presentarse expresamente y solo es mencionado en frase ligadas al desplazamiento como *espacio recorrido*; paradójicamente luego se hace uso de él sin restricción al estudiar conceptos como el de campo.

La noción de espacio-tiempo presentada como tal, incluyendo la noción de suceso se incorpora en tan sólo dos de los textos estudiados (Santillana, Galindo y otros Ed.:McGraw Hill).

En los textos de 4º de ESO se estudian con atención los aspectos cinemáticos y los sistemas de referencia sin embargo, no realizan reflexión acerca de los conceptos básicos de espacio y tiempo, alguno de ellos ( ej. Edelvives) hace una presentación de la teoría de la relatividad bastante amplia, pero en su exposición como material de trabajo complementario se deslizan aspectos que se podrían calificar de anómalos, por ejemplo: “*La teoría*

*especial de la relatividad estudia los movimientos rectilíneos y uniformes.*” Esta afirmación es incorrecta y se entronca con un error muy extendido, dado que la teoría especial estudia todo tipo de de movimientos, confunde Sistema de Referencia Inercial y el manejo de diferentes SRI para el estudio de los problemas físicos, tales como el movimiento, con el movimiento que puede describir un móvil, que puede moverse como se desee, en forma acelerada o no, y se puede estudiar perfectamente desde los diversos SRI.

1.3	¿En la introducción de las leyes de Newton, se analiza el concepto de masa y se efectúa una clarificación entre la perspectiva inercial y gravitatoria?	<b>%Sí</b>	<b>Sd</b>
		58	11

Supera el 40% el porcentaje de textos que no indagan en el concepto (% favorable a la hipótesis que se mantiene). La masa, en general, no merece una excesiva atención en los textos de 1º de bachillerato, y conviven definiciones diferentes; desde la mera omisión de la misma, que se da en dos de los textos, remitiendo a lo estudiado en niveles anteriores (por ejemplo Anaya) a la definición tradicional de masa como cantidad de materia del cuerpo que aparece en cuatro de los textos, en frases como “La masa inerte es *la cantidad de materia del cuerpo*”. En la mayoría aparece definida en términos de coeficiente relacional entre fuerza y aceleración (por ejemplo: Santillana, EDB...) y también hay la equiparación de ambas definiciones (por ejemplo: Everest).

El concepto de masa gravitatoria no se introduce más que en 50% de los textos de 1º (por ejemplo: Everest; Galindo y otros de ed. Mc Graw) y su vinculación con la masa inercial no se clarifica excesivamente, de hecho, resulta excepcional el enunciar la equivalencia de ambas masas enunciando como referente el principio de equivalencia introducido con la Relatividad General, lo que se da en dos textos (Everest; Galindo y otros de ed. Mc Graw).

Por otra parte en dos libros se cuestiona la invarianza de la masa y se introduce expresamente el concepto de masa relativista (Everest), a veces incluso con apartados explícitos, (por ejemplo: Bruño):

“¿Varía la masa de un cuerpo? .....*Según la relatividad la masa no es constante, depende de la velocidad del cuerpo:  $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$* ”.

Esta introducción de la masa relativista que aparece ya en algunos textos de 1º de bachillerato, y sin mayores salvaguardas, va en contra de la opción didáctica que se ha asumido de forma razonada en los capítulos precedentes; y además contribuye a reforzar la hipótesis de que su uso está todavía bastante extendido entre los materiales didácticos.

Otros textos avanzan incluso ideas relativistas que no podemos calificar como una opción didáctica más o menos conveniente, sino directamente como incorrectas:

( Bruño): *“La ecuación más conocida de Einstein expresa la interconversión entre la masa (m) y la Energía (E):  $E= m c^2$ . Donde c es la velocidad de la luz en el vacío”.*

La idea que se muestra es la rechazable interconversión de masa en energía y viceversa, como ya se ha expuesto anteriormente, parece que se propone un trasvase entre masa y energía, como dos entidades alternativas, en contradicción con el concepto de equivalencia. La equivalencia se pone de manifiesto por ejemplo cuando se plantea la energía de una partícula:

$$E_0= Mc^2= \sum m_i c^2 + \sum E_{ci} + \sum E_{pi}$$

En torno a estas mismas ideas, a veces no se da coherencia entre las distintas afirmaciones vertidas en el texto y se cae, lisa y llanamente, en el error conceptual, por ejemplo en un texto (Everest) se lee:

*“... La moderna teoría de la relatividad admite que cualquier variación que se origine en la energía de un sistema necesariamente conlleva una variación en su masa y viceversa; los cambios en la masa de un sistema se traducen en una variación en su energía.*

$$\Delta E/\Delta M = c^2$$

... Pero a continuación recapitula:

*“ la masa puede aniquilarse convirtiéndose en energía o viceversa”.*

Si bien la primera parte es plenamente asumible es en sí misma contradictoria con la segunda, que constituye el mencionado error.

Llama la atención el tratamiento que se da en dos textos de una misma editorial, en una de ellos (Astralia XXI de Mc Graw Hill) se enuncia claramente tras una discusión orientada a interpretar la ecuación  $E= mc^2$  como un proceso de transformación masa en energía *“ La energía no se crea ni se destruye, pero se transforma de unas formas en otras, incluyendo la materia”* por el contrario en uno de los textos se expone una explicación más precisa de esta expresión: *“ En una reacción, las masas totales, inicial y final, no tienen por qué ser iguales; el defecto o exceso de masa  $\Delta m$  se compensa en un exceso o defecto de energía cinética  $\Delta K$  en el proceso, de modo que siempre*

$$\Delta K= \Delta m.c^2 “$$

Esta explicación, a un nivel de 1º de bachillerato es una forma bastante precisa de interpretar la familiar fórmula  $E=mc^2$  en una reacción nuclear, por un lado obvia en su formulación discusiones de un nivel excesivo relativas a la definición de masa del sistema (distinta a la de  $\sum m_i$ ), cantidad de movimiento, retroceso de las partículas, etc., y centra su atención en las masas de las partículas iniciales y finales (en reposo, usa por tanto una única masa para las partículas). Por último constata la existencia de una diferencia entre ambos

valores y plantea que hay una energía cinética correspondiente asociada al movimiento de los productos de la reacción:

$$E=(\sum m_i c^2)_0 =(\sum m_i c^2 + K)_1 \text{ donde se toma } K_0 = 0 \text{ por simplicidad.}$$

y despejando, efectivamente:

$$K_1= (\sum m_i c^2)_0 -(\sum m_i c^2 )_1 =[(\sum m_i)_0 -(\sum m_i)_1 ]c^2 = \Delta m.c^2$$

Así formulado es correcto y relativamente sencillo pues no se profundiza en el problema de la constitución interna de la materia que da lugar a los valores de  $m_i$  como partícula compleja, y también se eluden frases de transformación de masa en energía (la definición de masa de un sistema compuesto con partículas en movimiento no es sencilla y en general  $M$  del sistema =  $\sum m_i$  ).

Si se revisan los manuales de 4º de ESO se concluye que no se detienen en el concepto de masa, la mayoría de los textos la introducen como masa inercial, o simplemente no la introducen explícitamente. En uno de los textos se hace referencia a la teoría de la relatividad, en un apartado destinado a la misma en el marco de un tema destinado a la energía. En la exposición se mantienen formulaciones erróneas del tipo: “  $E= mc^2$  significa que la masa y la energía se pueden interconvertir” . Por último también en uno de los textos se mantienen referencias a la masa en la acepción de masa relativista: “ *Un objeto en movimiento aumenta su masa* ” ( $m_r$  implícita), lo que no solo parece aventurado introducir en 4ºESO y además, por las razones ya expuestas no es la opción científica ni didáctica asumida.

1.4 ¿En el aprendizaje de la cinemática o la óptica se aborda, aunque sea tangencialmente el problema de la medición de la velocidad de la luz y su relevancia lógica y epistemológica?	<b>%SÍ</b> 21%	<b>Sd</b> 9
---	-------------------	----------------

Hay cerca de un 80 % de textos (favorable a nuestra hipótesis) en que no se presta atención a este punto, únicamente en uno de los textos de 1º de bachillerato se enuncian, con cierta amplitud, las limitaciones asociadas a la composición de velocidades con la luz y su carácter de velocidad física límite; en otro de ellos se realizan únicamente menciones de este punto.

Tampoco este aspecto se refleja en los textos de 4º de ESO, aunque en un mayor porcentaje, pues merece su mención en 3 de ellos.

En suma, esta omisión no hace sino reforzar la hipótesis en el sentido de la muy escasa atención que se presta al estudio de aspectos que devendrán importantes para el estudio de la Teoría de la Relatividad.

## 2. COMPLEMENTO PARA 1º DE BACHILLERATO

2.1	¿Se usa, aún ocasionalmente, en el estudio de la mecánica la valoración de trayectorias, y otras magnitudes, desde distintos sistemas de referencia?	<b>%Sí</b> 42	<b>Sd</b> 14
-----	--	------------------	-----------------

Este estudio está ausente en cerca del 60% de los textos (% favorable a la hipótesis), en los cuales no se efectúa sistemáticamente ni siquiera en el tema de introducción a la cinemática o en el de fundamentos de la dinámica, por otra parte tampoco se profundiza en lo relativo a la forma de la trayectoria.

El carácter relativo del movimiento es enunciado en la gran mayoría de los textos, como un lugar común, sin embargo no es objeto de un tratamiento sistemático, y aunque se enuncia la posibilidad del uso de distintos sistemas de referencia, esta capacidad de uso se limita a la elección del sistema y no se llevan a cabo estudios desde diferentes sistemas en prácticamente ninguna ocasión.

Si se amplía la mirada para observar si el uso de sistemas de referencia explícitos se da a otras partes de la física de 1º de bachillerato, por ejemplo al estudiar nociones de electromagnetismo, se pone de manifiesto que el sistema de referencia está por lo general oculto y la presentación es siempre más bien analítica y poco conceptual. En tan sólo un caso se suscitan reflexiones acerca de cuestiones tales como modificación de la ley culombiana con el movimiento de las cargas.

En suma, conforme a lo obtenido, el manejo fluido de sistemas de referencia dista de ser algo usual en este nivel.

2.2	¿Se plantea el principio de relatividad de Galileo, discutiendo explícitamente sus hipótesis subyacentes?	<b>%Sí</b> 17	<b>Sd</b> 11
-----	---	------------------	-----------------

Este estudio presupone no solo la enunciación de la relatividad del movimiento sino indagar en sus presupuestos y manejar los distintos sistemas de referencia. Pero tan sólo se plantea como tal, de forma explícita, en dos de los textos, con la salvedad de que los estudios se realiza en el marco cinemático. No se le presenta explícitamente con relevancia, en la generalidad de los textos (ausentes en el 83%, lo que resulta en apoyo a la hipótesis) en que ni siquiera se le menciona como tal principio. En el estudio cinemático del movimiento se manejan sus conclusiones acerca de la aditividad de velocidades en otros dos textos pero sin un estudio más profundo.

2.3	¿Se enuncia el principio de relatividad galileano con relación a la invarianza de las leyes de la mecánica, o como una mera transformación de velocidades y posiciones entre sistemas?  Al menos se estudia la transformación cinemática	<b>%Sí</b>	<b>Sd</b>
		8	8
		33	14

El % favorable a nuestra hipótesis supera el 90% en cuanto a la escasa profundización en el principio, ni siquiera la faceta cinemática está generalizada (en 67% de los casos ni se enuncia, lo que es favorable a la contrastación de la hipótesis). Tan solo en uno de los textos el marco de la transformación incluye explícitamente el tiempo y se plantean las transformaciones de Galileo. Un solo texto incluye las reflexiones acerca de la aceleración entre SRI y las repercusiones en la estructura de las leyes dinámicas.

De todas formas, en ningún caso se extiende su alcance a su versión más fuerte como tal principio de relatividad acerca de la forma de la forma de las leyes físicas.

### **CUESTIONARIO DE LIBROS DE TEXTO 2º BACHILLERATO:**

Se han analizado 11 libros de texto de 2º de bachillerato en el marco de una investigación más amplia sobre la enseñanza de la relatividad en este nivel. Entre ellos se hayan prácticamente todos los de una mayor implantación en los centros, son por tanto muy representativos. Las cuestiones planteadas y los resultados obtenidos son:

<b>1.-Aspectos epistemológicos e históricos</b>		<b>%Sí</b>	<b>Sd</b>
1.1	Se muestra, aún brevemente el contexto problemático de los experimentos y sus hipótesis de partida.	64	15
1.2	Se pondera la importancia del experimento de Michelson y Morley	46	15
1.3	Se ofrece una visión tentativa en el avance científico, y el papel comunitario del avance	54	15
1.4	Se hace un uso de la figura de Einstein, que no suponga una distorsión de la imagen del científico	73	13
1.5	Se efectúan atribuciones dudosas	46	15
1.6	Se valora adecuadamente el aspecto acumulativo no lineal del avance científico y la existencia de resistencias al cambio	27	13

1.7	Se destacan las limitaciones derivadas de la propia naturaleza del conocimiento científico	27	13
1.8	Se muestran, aun tangencialmente las repercusiones del avance científico en el entorno cultural.	36	15

Existe una amplia dispersión entre el enfoque de los distintos libros acerca del tema, y puede sintetizarse que en el 64% de los textos, ítem 1.1, (36% favorable a nuestra hipótesis) no se plantea suficientemente la situación problemática de partida. En algunos textos el interés que se muestran hacia la forma en que se produce el conocimiento científico se limita a referencias al inicio del tema, un tanto estereotipadas, y circunscritas mayoritariamente al problema del éter, sin un interés cierto en profundizar en la situación problemática ni dimensionar la naturaleza de los problemas.

Por ejemplo (SM) Tras introducir el concepto de éter y su papel como Sistema de Referencia absoluto:

*La teoría electromagnética desarrollada por Maxwell predecía la existencia de ondas electromagnéticas con velocidad  $c=3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ , y la comprobación de su existencia en 1887 por Hertz llevó a identificar la luz como una onda electromagnética que podía viajar a través del espacio vacío. Estos hechos determinaron el abandono de la teoría de la existencia del éter.*

La epistemología que subyace es la de que un hecho experimental, de interpretación unívoca y automática, ha modificado un marco teórico previo por-se, por otra parte deforma totalmente el sentido del hallazgo de Hertz que podemos centrar más en la confirmación del carácter ondulatorio de la luz y en el refuerzo de la síntesis maxwelliana que en el cuestionamiento del espacio absoluto y el éter.

En otros manuales, por el contrario podemos afirmar que realizan un planteamiento suficientemente ajustado, por cuanto profundizan en la situación problemática y conducen a una visión más correcta de lo que es la ciencia y cómo se elabora.

El experimento de Michelson y Morley está presente en todos los textos, y ocupa en algunos un lugar de una gran relevancia por la extensión que le dedican y la profundidad con que se trata, esto se da incluso en textos donde se detectan omisiones relevantes.

Sin embargo, su presentación muestra importantes deformaciones que llevan a concluir que tan solo en el 46% de los textos, ítem 1.2, se le pondera de una forma que podemos conceptualizar como correcta; en al menos en un 54% (favorable a nuestra hipótesis) su presentación está descentrada.

Una deformación muy corriente resulta ser la sobrevaloración que se da en algunos textos acerca del papel jugado por el experimento de Michelson (por ejemplo, Ed. ECIR) y el papel de teóricos atribuido a sus autores, cuando se sabe que las ideas teóricas básicas que sustentaban el experimento de Michelson Morley provienen de Maxwell, al igual que el concepto de viento del éter (ver por ejemplo Berkson 1985), a Michelson le cabe el mérito del método experimental y su realización junto con Morley, no las ideas teóricas de partida que se le atribuyen de forma indiscriminada.

Pero igualmente en el análisis de las repercusiones del mismo, base de la importancia que se le atribuye en los textos aparecen distorsiones claras: (por ejemplo, SM): *“Como consecuencia del resultado negativo de la experiencia: Se demostró que el éter carecía de propiedades físicas medibles, luego era innecesario postular su existencia...”*

En la misma línea pero con una deformación mucho más clara: (Everest):

*Las experiencias de Michelson y E.W. Morley en 1887, demostraron que:...*

*De acuerdo con esto, la existencia del éter no tiene sentido físico alguno... Como resultado de las consecuencias físicas que implica la ausencia de éter, y por tanto de un sistema universal de referencia con respecto a quien definir el movimiento absoluto, surgió la teoría de relatividad restringida.*

La idea inducida es el automatismo entre el experimento de Michelson y Morley y su interpretación, así como la minusvaloración de la inventiva que condujo a la Teoría de la Relatividad. Posiblemente no es ajeno a este hecho la nacionalidad de su autor, uno de los primeros físicos estadounidenses de relevancia y la amplia difusión de los textos universitarios de esta nacionalidad. Para ponderar su papel se puede leer a Holton (1982), (o en Williams 1968).

Un aspecto de interés, que se da en la generalidad de los textos, es el hecho de que en todos los estudios se suelen iniciar con la idea de que en la perspectiva del XIX, es necesario un éter capaz de sostener un movimiento ondulatorio de la luz, y posteriormente no se menciona, comenta o justifica cómo se propaga la luz sin su concurso, por ejemplo (Ed. ECIR):

*“Einstein niega la necesidad del éter como el medio... y afirma que la luz se puede propagar en el vacío porque se trata de un campo electromagnético como ya habían demostrado Maxwell de forma teórica y Hertz de forma experimental”.*

Si este razonamiento fuese suficiente no hubiese sido un aspecto problemático para los grandes físicos de finales del XIX. Lo que hace verosímil la eliminación de éter, y por tanto la afirmación de Einstein, es la modificación de la mentalidad física que se va desplazando desde el mecanicismo hacia una concepción del mundo más cercana a la teoría de campos y que culmina con las teorías electromagnéticas y del electrón de Lorentz. Este, en sucesivas fases de su trabajo va despojando de propiedades al éter hasta tal punto que

en palabras de Einstein: “*En lo que se refiere a la naturaleza mecánica del éter de Lorentz, puede decirse, con cierto espíritu lúdico, que la inmovilidad es la única propiedad mecánica de la que H.A. Lorentz no le ha privado.....*” (Berkson 1981). Lo que abona la hipótesis es que realmente el planteamiento histórico no se encuadra en un enfoque didáctico que lo usa para favorecer la construcción de conocimiento en un proceso de investigación dirigida.

El aspecto colectivo inherente al concepto de comunidad científica trabajando de modo tentativo en la resolución de problemas, ítem 1.3, no aparece suficientemente claro, en el 54 % de los textos sí se muestra debate, aunque más bien se trata de una secuencia de aportaciones, por lo que al menos muestran interrelación y cooperación, que está ausente en otro 46% (favorable a nuestra hipótesis)

La figura de Einstein está por lo general adecuadamente tratada (74%), ítem 1.4, aunque se cae en algunos textos en una glosa excesiva, especialmente por las atribuciones incorrectas que a veces se le atribuyen, por ejemplo en indicar como una de sus aportaciones el aumento de la masa con la velocidad (Ed. Editex), su uso del experimento de Michelson y Morley, etc.. Curiosamente también en uno de los textos no se le da la relevancia que su aportación requiere citándole solo de pasada.

En el capítulo de las atribuciones, ítem 1.5, se registran en el 46% de los textos (favorable a nuestra hipótesis) pequeñas imprecisiones e incorrecciones de más bulto en la asignación. Por ejemplo, se detecta en algún libro (por ejemplo: Ed. SM) una atribución incorrecta, en cuanto al significado de las transformaciones de Lorentz. Como se sabe, si bien fueron introducidas por Lorentz, su marco conceptual era distinto al de la Teoría de la Relatividad y por ejemplo, en ellas el tiempo juega para Lorentz un papel de auxiliar matemático, sin cuestionar el concepto de tiempo universal. Es la interpretación de Einstein la que les dota del significado físico que hoy aceptamos; por ello no cabe atribuir a Lorentz razonamientos con  $t$  que son debidos a Einstein.

Entre los aspectos epistemológicos e históricos cabe plantear si se da relieve al hecho de que nos encontramos con una fase de cambio crítico, acelerado en el conocimiento científico. Este aspecto no es manifiesto en los textos, que aunque efectivamente debaten y muestran el cambio en los conceptos físicos no proporcionan (ítem 1.6 con solo un 27% que lo realizan aceptablemente) una visión de cambio acelerado, crítico. Esta es una característica importante a resaltar en un modelo mínimamente actualizado de la evolución del conocimiento científico que ha de resaltarse tanto en el bagaje cultural como en la visión de la ciencia a potenciar en los estudiantes (un 73% favorable a nuestra hipótesis de escasa atención).

En un plano paralelo, en general no se patentizan los propios límites de la relatividad especial, (lo hacen en algún grado el 27% de los textos, ítem 1.7, con un 73 % favorable a la hipótesis), ni se muestra su superación en la Teoría General o se apunta a la incompatibilidad de fondo con la teoría cuántica. Se induce por ello la idea de la ciencia como un conocimiento acabado, unívoco

sin incoherencias internas, se desaprovecha así el aspecto paradigmático que supone epistemológicamente la propia Teoría de la Relatividad.

Por último los relevantes aspectos CTS no alcanzan a la generalidad de los tratamientos, como muestran los resultados del ítem 1.8, y tienen un peso apropiado tan sólo en el 36% de los textos (64 % favorable a nuestra hipótesis).

## 2.- Aspectos lógicos

%Sí Sd

### *Ubicación en el marco de la Física*

2.1	Se resalta su papel central y su radical innovación acerca de la noción del espacio y el tiempo	73	13
2.2	Se resaltan sus repercusiones en todas las áreas de la física ej. sobre nociones como acción a distancia, causalidad etc.	27	13

En la práctica totalidad de los textos se estudian las nuevas nociones, la cuestión es si se quedan en un formulismo o se hace hincapié y se transmite la importancia del cambio. En una cuarta parte de los textos esto no se realiza (27 % del ítem 1.2) y en tres cuartas partes de los manuales esta declaración de importancia no se pone en valor ejemplificando sus repercusiones en algunas otras áreas, (recogido en el ítem 2.2, en que se recoge que solo en un 27% se indica alguna vinculación, 73 % favorable a nuestra hipótesis).

### *Principios, postulados e ideas a cerca de la propagación de la luz*

%Sí Sd

2.3	Se resalta la relación entre el Principio de relatividad y la relatividad galileana	82	12
2.4	Se menciona que igualdad de velocidad no implica igualdad en el resto de características de la luz.	9	9
2.5	Se muestran limitaciones al uso de los sistemas inerciales y se avanza su extensión otros sistemas.	18	12

La vinculación con la relatividad galileana está presente en todos los textos, como no podía ser de otra manera. No obstante, hay una amplia dispersión en la importancia con que se trabaja este aspecto (incluso un 17%, no lo resalta suficientemente, ítem 2.3), desde los que efectúan un estudio suficientemente amplio y conceptual del mismo, profundizando en su vinculación con el espacio absoluto y el éter y los que se limitan a una corta referencia.

En consonancia con el enfoque epistemológico ya analizado no se pone de manifiesto las limitaciones en el uso de SRI más que en un número reducido de textos, ítem 2.5, esto solo se realiza en el 18% de los textos (82% favorable a nuestra hipótesis).

En cuanto a la propagación de la luz, aspecto cuya comprensión esta en la base de la asimilación cualitativa de muchos efectos y paradojas no se trabaja el hecho de que la luz posee características diferentes a su propia velocidad de propagación, en un solo texto se enuncia explícitamente este hecho (esta desatención alcanza un favorable 91% a favor de la hipótesis, ítem 2.4). La clarificación de estas ideas tampoco se realiza en ejercicios o comentarios, ni se sale al paso a concepciones erróneas muy extendidas entre los estudiantes de mezclar corrimientos de frecuencias, con desplazamientos reales , etc..)

3.- Aspectos clave, consecuencias	%Sí	Sd
3.1 Se insiste en el papel de la medición, observadores etc., en línea con el operativismo.	36	15
3.2 Se da a entender su aplicación en exclusiva a altas velocidades	45	15

El papel de observador sigue muy presente en las exposiciones de la Teoría de la Relatividad y, si bien cierto uso es adecuado, se considera en el ítem 3.1 ( 36% afirmativo, 64% favorable a nuestra hipótesis) que más de un tercio de los textos abusan de este recurso y la literatura se inunda de observadores efectuando operaciones, en contraste con el resto de los temas incluidos en el manual.

También con efecto de simplificar argumentaciones se cae en auténticas paradojas lógicas, sirva este ejemplo de reloj de luz (manejado en Ecir):

*“... utilizaremos un reloj de luz consistente en un cilindro que posee en la parte superior un espejo E y en su base una fuente luminosa F y un reloj.... La fuente luminosa emite un destello, el rayo de luz viaja hacia el espejo y cuando choca con él el reloj se detiene....”*

Nadie aclara ese mecanismo de propagación de una señal instantánea que hace detenerse el reloj.

La depuración de argumentos hoy obsoletos no es completa, por ejemplo el recurso al par de estrellas binarias en movimiento relativo, para mostrar la constancia de la velocidad de propagación de la luz, es un ejemplo histórico pero que todavía aparece en algún libro (ej. Bruño), como se sabe, los mecanismos de emisión/absorción en las nubes estelares pueden anular el efecto de fuente (French 1991), por lo que hoy no se admite como tal prueba.

Por último al plantear la utilidad de la TER y su campo de aplicación, un 45% de los textos dan a entender (ítem 3.2) su aplicación exclusiva a altas velocidades, (favorable a nuestra hipótesis). Esta afirmación es innecesariamente limitativa y deja fuera aspectos tales como la energía nuclear. Esto no es contradictorio con el necesario estudio de la vinculación entre las transformaciones de Lorentz y Galileo.

**Ideas acerca del espacio, longitud.**

**%Sí Sd**

		<b>%Sí</b>	<b>Sd</b>
3.3	Se clarifican las posibles ideas alternativas de los alumnos en línea con ideas mantenidas en otros tiempos ej. Contracción de Lorentz Se clarifica la visión microscópica de la contracción	27	13
3.4	Se muestra la simetría entre los magnitudes en dos sistemas inerciales distintos.	27	13
3.5	Se clarifica que ver y medir son conceptos diferentes	18	12
3.6	Se insiste en la asimetría de las distintas direcciones	45	15

En cuanto a la cuestión 3.3, referente a la contracción de Lorentz-Fitzgerald se asigna por lo general a varillas y cuerpos rígidos, no se suele hacer mención al hecho de que no es un fenómeno ligado a la materia, relacionado de alguna forma con su existencia o constitución, sino al propio espacio. Si marcamos simplemente dos posiciones en un sistema (las correspondientes a los extremos de una varilla, esté o no esté esta) y evaluamos simultáneamente las posiciones de los puntos en el otro sistema (los de la hipotética varilla) una vez transformados, la contracción aparece exactamente igual (Tengamos en cuenta que para medir no es necesario recurrir a cuerpos materiales rígidos, para evaluar la distancia entre dos cuerpos por ejemplo tierra-sol se usa telemetría laser). Por lo general no solo no se sale al paso del error, sino que se da pie a concepciones erróneas, tales como la búsqueda de mecanismos de contracción ligados al binomio materia-movimiento parece que sea un fenómeno que sucede a los cuerpos en un espacio absoluto, eludiendo el hecho de que cada sistema de referencia supone un espacio y un tiempo diverso.

En cuanto al proceso histórico de la introducción de la contracción de Lorentz-Fitzgerald hay verdaderas explicaciones erróneas: (ej. Everest) indican:

*...admitiendo la constancia de la velocidad de la luz, propusieron la hipótesis de que los dos brazos del interferómetro, aun siendo exactamente iguales, debieran comportarse con distinta longitud...*

... La fórmula propuesta por Fitzgerald-Lorentz, postulada en un marco exclusivamente teórico, fue confirmada matemáticamente por la teoría de la relatividad de Einstein.

La primera frase es errónea por cuanto lo que se pretendía con la hipótesis era mantener la aditividad galileana de las velocidades y buscar mecanismos físicos en la interacción éter-materia para explicar físicamente una supuesta contracción real del interferómetro.

El segundo párrafo es insostenible; tan teórica y deducida era la propuesta de Lorentz (si bien más artificiosa y con hipótesis ad-hoc sobre la estructura del electrón) que la einsteniana.

En cuanto la adecuada precaución acerca de lo que sucede en dirección transversal al movimiento, más del 50% de los textos no lo consideran, ítem 3.4.

Ocasionalmente se sigue manteniendo el verbo *ver* (en vez de medir, evaluar...) para indicar aspectos tales como contracción de varillas (ej. Bruño, Everest...), error ya muy señalado en la literatura. En general no se es cuidadoso en el manejo de verbo “*ver*” en los experimentos en que está involucrado un tiempo de propagación de la señal; el ítem 3.5 registra que en solo el 18 % de los textos se enuncia explícitamente la diferencia. En muchos más se usa el verbo *ver* y *medir* como sinónimos; por ejemplo, en un análisis de simultaneidad, aparecen frases que utilizan este verbo obviando todo tipo de procesos de propagación.

Ideas acerca del tiempo.		%Sí	Sd
3.7	Se precisa el concepto de tiempo propio	64	15
3.8	Se insiste en la simetría entre las mediciones en SRI distintos	27	13

Con relación al tiempo se observa en algún texto (por ejemplo Anaya, Edebé) que se manejan dos planos diferentes de realidad, según sea el tiempo propio o el correspondiente a un fenómeno que sucede en un cuerpo en movimiento. Para este caso se reserva la palabra “*aparente*”. Ya se indicó al estudiar este ítem como esta noción no solo era innecesaria sino que venía a negar la propia relatividad. Todos los tiempos evaluados en un sistema de referencia son igualmente reales en ese sistema. No son admisibles expresiones como:

... el corazón del pasajero **aparentemente** late más despacio.

*El tiempo de un sistema en movimiento parece dilatarse respecto al tiempo medido en un sistema en reposo solidario con el observador.*

Esta concepción se constituye como un obstáculo al cambio conceptual, se mantiene con persistencia incluso en estudiantes graduados (Hewson 1981) y así se comprende que se traslada paralelamente a manuales de bachillerato.

Por otra parte se obtiene en el caso del tiempo resultados similares a los del estudio del espacio, (36 % de falta de explicación del concepto de tiempo propio, cuestión 3.7y que en más de un 70 % de los casos no se insiste en la igual validez desde distintos sistemas, ítem 3.8).

#### Acerca de errores en la explicación de la simultaneidad:

La producción de libros de texto y materiales para los alumnos no es sencilla, y a veces pueden deslizarse razonamientos confusos, o erróneos. Se suele usar al razonar el ejemplo típico de Einstein en el que un jefe de estación situado en el centro del andén recibe en sus ojos simultáneamente dos rayos que habían marcado previamente de forma indeleble, chamuscando, el inicio y el fin del andén así como la cabeza y cola de un tren que pasa. Como los recibe simultáneamente, y chamuscaron puntos equidistantes de él, colige que impactaron simultáneamente en dichos puntos; por otra parte, estudiando al viajero del centro del tren concluye que le llegará antes el rayo de la cabeza que el de la cola.

Si consideramos ahora otro sistema de referencia en movimiento (por ejemplo el tren) , el viajero situado en el centro se considera a sí mismo en reposo y recibe primero la señal de la cabeza del tren y después la de la cola. Como comprueba que están chamuscadas la cabeza y la cola, que son equidistantes de él, concluye que no fueron emitidos simultáneamente en su sistema, para el viajero impactó antes el de la cabeza, por eso no le extraña que haya recorrido más espacio la señal de la cabeza y llegue en el mismo instante que el de la cola al jefe de estación.

Como se observa se mantiene así la coherencia causal del orden de llegada de las señales y ambos discrepan de la simultaneidad de la caída de los rayos, y si uno de los dos afirma que las señales se emitieron simultáneamente en su sistema de referencia el otro afirmará que en el suyo no se emitieron simultáneamente (relatividad de la simultaneidad). Nunca se suscitará una discusión en la cual ambos afirmen que en su sistema fueron emitidos simultáneamente. Ambos estarán de acuerdo en el orden de los sucesos que le acaecen a cada uno de ellos. (no así de la simultaneidad con que llegan al jefe de estación).

Por ello son erróneos razonamientos como lo siguientes recogidos por ejemplo en un texto (Anaya), en que estudiando este experimento del tren se afirma:

*“ Situados en O, percibimos los dos sucesos como simultáneos e interpretamos que no lo son para el observador situado en O'. Sin embargo, situados en O' percibimos los dos sucesos como simultáneos e interpretamos que no lo son para el observador situado en O. La simultaneidad es, por tanto un concepto relativo.”*

Hay que rechazar la segunda parte de la frase, considera que ambos pueden afirmar la simultaneidad en su sistema, y tal cosa es inviable, ( cuestionaríamos incluso la causalidad y el orden de los sucesos).

Y más adelante:

*“Dos acontecimientos que son simultáneos para un observador no tienen por qué serlo para un segundo observador” (Hasta ahí de acuerdo)*

*“Ahora bien; ¿ Qué observador tiene razón, respecto a la simultaneidad de los dos acontecimientos, el situado en O que los ve como simultáneos, o el situado en O' que desde el punto de vista de O, no puede verlos como tales?”*

*Desde un punto de vista relativista ambos están en lo cierto. No existe un sistema de referencia absoluto que nos permita establecer quien tiene razón. Si suponemos que O' está en reposo y que es O el que se mueve hacia la izquierda con velocidad v, el resultado que obtenemos en el razonamiento es justamente al contrario.”*

Todo esto es rechazable, una cosa es la determinación de velocidades en la que cada uno puede utilizar el criterio propio y otra cosa es la determinación de simultaneidades y la secuencia de eventos que acaecen sobre un objeto, que ha de percibirse como única para todos los SR. Una vez que se proporcionan datos ciertos, que nos permitan obtener para un observador la simultaneidad de dos eventos, o conocidos datos de posiciones y tiempos en un SR, quedan determinados posiciones y tiempos en el cualquier otro sistema de forma unívoca. La teoría de la relatividad proporciona relatividades en ciertos aspectos pero es muy “ absoluta” en otros.

**Composición de velocidades.**

**%SÍ Sd**

3.9	Se compone alguna velocidad con la de la luz para reafirmar los problemas de aditividad.	36	15
-----	--	----	----

Los aspectos de propagación de la velocidad de la luz junto al uso de la cinemática relativista en la composición de velocidades están en la base de la comprensión del concepto de simultaneidad y de ahí en la asimilación del concepto del espacio-tiempo relativista. Sólo un 36% de los textos plantean el ejercicio de la composición de una velocidad con la de la luz e ilustran las paradojas aparentes (ítem 3.9).

<u>Acerca de la energía y la masa.</u>		%Sí	Sd
3.10	Se introduce el concepto de masa relativista.	82	12
3.11	En este caso, la introducción es consistente y se exponen sus limitaciones y eventuales inconvenientes.	22 9 text	14
3.12	Se establece de forma correcta la equivalencia masa-energía.	82	12

En cuanto al uso del concepto de **masa**, en un total de 9 textos se hace referencia al concepto de masa relativista lo que supone un 82 % de los textos analizados (ítem 3.10). En tan sólo dos de ellos ni se menciona el concepto, la única masa que aparece es la masa invariante.

Esta cifra no obstante, no es suficientemente clarificadora por cuanto no hay una uniformidad en la importancia atribuida al concepto y la extensión de su uso. La introducción del concepto de masa relativista arrastra un conjunto de opciones anejas, tales como la atribución de masa al fotón, o su vinculación con la energía. Cabe por otra parte quedarse a medio camino introduciendo el concepto de masa relativista pero asumiéndola de un modo convencional, no atribuyendo a dicha masa un carácter físico esencial sino simplemente formal, como agrupación funcional de magnitudes (por ejemplo en Santillana).

Otros textos se enmarcan totalmente en el uso de la  $m_r$  (ejemplo en editorial Edebé): *“Einstein dedujo a partir del principio de conservación de la cantidad de movimiento que la masa de un cuerpo depende de su velocidad según la siguiente fórmula:  $m = (1/\sqrt{1-v^2/c^2}).m_0$  , ...Observa que la masa de un cuerpo aumenta con su velocidad de tal manera que cuando su velocidad se aproxima mucho a  $c$ , la masa se hace infinitamente grande. Esto significa que la fuerza necesaria para acelerar un cuerpo hasta la velocidad de la luz es infinita...”*

En este extracto se condensan muchos puntos de interés: En primer lugar hay una deformación acerca del papel de Einstein en cuanto a la masa relativista, en el primer capítulo se ha estudiado este punto. En segundo lugar el propio concepto de masa relativista que se ha rechazado. Finalmente se observa como ha operado en el autor el mecanismo erróneo de utilizar por extensión esta masa inercialmente; esto es así puesto que la usa para razonar en torno a la fuerza necesaria para acelerar la partícula (la utiliza como una masa longitudinal en la ley de Newton) y al razonar acerca de la existencia de una velocidad límite. Estos mecanismos mentales son los que didácticamente se desea evitar en los estudiantes.

Por otra parte, los textos tampoco son coherentes internamente y muestran vacilaciones en los usos, el mismo texto en un ejercicio escribe: *“...calcula su*

*masa aparente....*” Estas vacilaciones no hacen sino inducir confusión en los lectores.

A la luz de estas incoherencias resulta pertinente la cuestión siguiente, la 3.11: ¿En este caso, la introducción es consistente y se exponen sus limitaciones y eventuales inconvenientes?

En efecto en otros dos textos la mención que se realiza es del todo formal, carece de presencia en el razonamientos y deducciones. De hecho, la introducción del concepto se presenta de tal modo explícitamente por lo que aparece como una salvaguarda clarificadora de los autores.

Cabe por tanto elevar el porcentaje de textos que no utilizan el concepto de  $m_r$  como una magnitud de importancia al 36 % de los textos. En el resto se enuncia explícitamente la variación de la masa con la velocidad y se glosa la importancia del concepto como un resultado importante de la teoría.

El experimento de Bertozzi de 1964 “ *la última velocidad*”. Un experimento acerca de variación de velocidad de electrones acelerados en función de su energía cinética, recibe un tratamiento relevante en dos de estos libros, en refuerzo de estas ideas.

**Otros aspectos y profundizaciones.**

**%Sí Sd**

3.13	Se usan correctamente las expresiones relativistas en todos los casos	82	12
3.14	Se reafirma explícitamente la validez del principio. de conservación de P en un SRI así como la de otras leyes de la física.	36	15
3.15	Se apuntan aspectos clave de la Teoría General de la Relatividad	54	15
3.16	El texto incluye profundizaciones de mayor nivel	36	15

Es de interés también el analizar, si la introducción de la masa relativista en algún texto, se acompaña de su uso de forma inapropiada en expresiones tales como  $F=m.a$  en el campo de uso en que resulta inaplicable la aproximación clásica. Si bien en el 82% de los casos no se detecta, efectivamente esto se observa en dos casos (situación favorable a nuestra hipótesis), en que se ha usado en la forma  $F= m_r.a$ , como ampliación de la ley clásica. Como se sabe esta expresión sería únicamente válida en sustitución de la llamada masa transversal para dirección normal al movimiento, por ejemplo en un movimiento circular uniforme y no en la dirección del movimiento.

La opción acerca de la masa establecida en el texto analizado arrastra un enfoque asociado en la equivalencia masa-energía y unos criterios de corrección en consonancia con la opción elegida. En términos generales todos son coherentes con su posición. No obstante, en dos de ellos (36%) se realizan afirmaciones erróneas manejando conceptos tales como “*Conversión masa energía*” de la que ya se ha debatido anteriormente y rechazado como incorrecta.

Por ejemplo (ed. SM ) en la interpretación de la relación  $E=mc^2$  : *La masa puede desaparecer a costa de la aparición de una cantidad equivalente de energía.* O (en Everest): *“La suma de la masa y energía del sistema ha de permanecer constante.”*

La atribución a Einstein de cualesquiera resultados de la teoría, no se ha superado en los textos analizados y, precisamente, se atribuye a Einstein la introducción del concepto de variación de la masa con la velocidad en 4 de ellos (57% de los que la introducen) esta afirmación elude su auténtico origen y no refleja la posición de Einstein al respecto quien apuntaba a los procesos cinemáticos derivados de las transformaciones espacio-tiempo..

En cuanto al tratamiento de los apuntes de la Teoría General, cuestión 3.20, aparecen también aspectos confusos, o directamente erróneos, (ej. SM):

*“La geometría de G. Riemman, propuesta en 1851, que describe espacios curvos de cualquier número de dimensiones proporcionó a Einstein el instrumento matemático para su teoría: el espacio de tres dimensiones se curva en una cuarta dimensión que es el tiempo”*.

Esta frase además de ininteligible para un alumno de bachillerato es incorrecta, en efecto, el espacio-tiempo tetradimensional introducido por Minkowski en los desarrollos de la Teoría especial de la Relatividad es un concepto físico independiente de la curvatura, o no, del mismo, isomorfo a un espacio matemático geométrico tetradimensional. El parámetro manejado al hablar de tetradimensionalidad es el concepto de dimensión. La curvatura del espacio se estudia al tratar sus características en el marco de la Relatividad General y resulta ser no euclidiano, se habla entonces de curvatura del espacio. La afirmación del texto parece indicar que hay un espacio tridimensional que se curva sobre el tiempo formando uno cuatrimensional.

Ocasionalmente se dan confusiones o redacciones que inducen a error. Por ejemplo (Everest) al estudiar el comportamiento de la luz en un campo gravitatorio en analogía a su paso en un ascensor acelerado:

*“La luz, al propagarse a través de un campo gravitatorio, se desvía en la dirección y sentido de la fuerza gravitacional actuante (desplazamiento hacia el rojo).”*

El texto incurre en una incorrección al confundir trayectoria del rayo con el desplazamiento gravitacional de la frecuencia.

Entre las diversas profundizaciones que podemos conceptualizar, en términos generales, como excesivas para el nivel del que se trata y poco favorecedoras de una asimilación de los aspectos clave del tema se detecta: La utilización relevante de diagramas de Minkowski en un 18% de textos). El uso de nociones de tetradimensionalidad en cerca de un tercio de los textos ( 27% de casos), este concepto es muy difícil de interiorizar sin preparación previa. E inclusive en algún texto se llega a introducir alguna noción métrica tal como el intervalo utilizando para ello números imaginarios con el uso de  $i$  para mantener la expresión euclídea de distancia (18% de los textos).

#### **4.2 VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CONTRASTACIÓN DE LA SUBHIPÓTESIS PRIMERA.**

Podemos concluir que en muchos textos el enfoque del tema no sigue un proceso de construcción de conocimientos a partir de un punto de partida basado en una situación problemática. Según muestran, el conocimiento parece surgir como algo preexistente en la naturaleza, descubierto por los científicos, más que como producto inventivo de la comunidad científica, con sus tentativas e imbricaciones en el medio cultural y social. Así, no es general partir de un conocimiento ya problematizado y con límites en su validez que se amplía, extiende, se reemplaza y/o se refina subsumiéndose en un nivel más complejo. Tampoco se muestra claramente que el nuevo conocimiento presenta, a su vez, marcos de validez y no constituye la “verdad absoluta” sino que debe falsarse y evaluarse.

Por otra parte se siguen manteniendo en un porcentaje alto de los textos una presencia importante de opciones hoy superadas tales como el uso de la masa relativista, no ha calado todavía en los textos, y en la didáctica de estos conceptos, un consenso nuevo en torno a su uso que se aplica en el trabajo cotidiano de los físicos en los laboratorios, en física nuclear o de partículas. Y aunque textos de referencia tales como Alonso y Finn (1995), Tipler (1995), Gettys Keller y Skove (1993), hayan cambiado de postura, para que los profesores modifiquen esas ideas no basta con decirles que son incorrectas (Alemañ 1997, Sánchez 2000). Las cosas no son tan sencillas ni en la ciencia ni en el aprendizaje. Además, es necesario explicitar las razones que sustentaban las ideas que se quieren cambiar, poner de manifiesto sus limitaciones para crear una insatisfacción con ellas y mostrar ideas alternativas que sean tan comprensibles y explicativas como las anteriores.

En los textos no se siguen habitualmente, estrategias sistematizadas de actuación sobre concepciones alternativas o líneas más frecuente de pensamiento de los estudiantes, no se trabaja excesivamente la construcción cualitativa de los conceptos, por ejemplo, no se usan versiones sencillas de herramienta pedagógicas para la formación del concepto de espacio tiempo como son los diagramas de Minkowski (Alonso 2000, Palekar 1993) que están prácticamente ausentes de los mismos o se usan a niveles excesivos (18% de los textos). En muchos casos parece como si la mera enunciación de los

conceptos y alguna explicación o ejercicio sobre los mismos proporcionase elementos para su asimilación por el estudiante.

Además, los textos presentan en algún caso errores y malinterpretaciones, algunas ya clásicas como en el tratamiento de la equivalencia masa/energía, otras menos evidentes como dificultades con la simultaneidad, la realidad de los fenómenos o la naturaleza de la contracción de Lorentz, etc.

Por último, tampoco parece establecido un acuerdo tácito entre los autores en torno al nivel de complejidad correspondiente al segundo de bachillerato. La dispersión entre temas así como la extensión y profundidad de los tratamientos es muy amplia, esto sin duda debido a la escasa tradición de su enseñanza en el bachillerato.

**En suma, tras el análisis realizado de los resultados del cuestionario, y de conformidad con las consideraciones apuntadas, podemos considerar que los libros de textos considerados globalmente presentan características que no favorecen el correcto aprendizaje de la TER conforme a la subhipótesis primera que se pretendía contrastar.**

#### **4.3 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CONTRASTACIÓN DE LA SUBHIPÓTESIS SEGUNDA**

Se ha obtenido la colaboración de un número variable de profesores para contestar las distintas cuestiones, pues se han obtenido en contextos diferentes y con un perfil distinto de los mismos:

Profesores en ejercicio con experiencia en la enseñanza de la física en el Bachillerato y COU	13
Profesores en formación siguiendo el curso de aptitud pedagógica CAP para impartir clase de Física y Química en el Bachillerato y la ESO	24

##### **1.-Aspectos epistemológicos e históricos.**

¿Qué aspectos señalarías como más significativos, en el desarrollo 1.1 histórico de la relatividad especial, y que a tu juicio deberían presentarse a los estudiantes?.

Esta cuestión fue planteada únicamente a los 13 primeros profesores y no a los 24 profesores en formación, y las respuestas obtenidas se pueden clasificar de la forma siguiente:

- La referencia una situación problemática, solo se encuentra presente en un 30% de las respuestas (70% de carencias a favor de nuestra hipótesis), pero sin pasar de una mención genérica sobre la necesidad de tomar en consideración los antecedentes previos, sin detallar aspectos del mismo.

Por ejemplo: "... acumulación de evidencias científicas que permitieron dejar de considerar el tiempo y el espacio como constantes y sustituirlo por otros."

- Las indicaciones acerca del proceso de elaboración de la teoría especial, o la heurística de Einstein. está presente en 28 % de las respuestas pero sin una elaboración que sugiera una epistemología o conocimiento suficiente del proceso histórico, (72% a favor de la hipótesis).

Por ejemplo: " La teoría fue esbozada íntegramente en la mente del científico sin pasar por la comprobación empírica".

- Si se señala en un 70% de los casos que se debería suministrar datos acerca de Einstein y su vida.
- En tan solo en un 15% de las respuestas se hace referencia directa al proceso de evolución física clásica *versus* física moderna. Las reflexiones sobre la acogida por la comunidad científica de la TER aparecen también en un tercio de los casos. Como la " validación por la comunidad científica". Sin embargo esta aportación no se deriva de un conocimiento cierto sino de una percepción genérica de resistencia al cambio, por ejemplo: "... la época en la cual Einstein formuló la teoría 1905. En la cual la sociedad le criticó"
- Por último se apunta en un 45 % de las respuestas que sería interesante estudiar las relaciones CTS pero a menudo mediante unas imprecisas " repercusiones en el desarrollo de la humanidad"

Alguna frase entresacada de entre las respuestas no deja de ser de interés, por cuanto parece no distinguir el tipo de problemas sobre el movimiento relativo de lo que son los problemas de la Teoría de la Relatividad:

*" Que desde que el tiempo y el espacio eran unidades absolutas, ahora se convertirán en unidades relativas, teniendo explicación de fenómenos cotidianos de la vida, como decir " estoy sentado en la silla e inmóvil, pero en realidad estoy moviéndome a la velocidad de traslación y rotación de la tierra"*

## **2.-Cuestionario sobre introducción de conceptos**

Esta parte del cuestionario se ha pasado a los dos últimos grupos (29 cuestionarios).

2.1 Indica que aspectos de relatividad convendría introducir y en que orden. Justifícalo brevemente. Indica, en cada caso, si se propone una introducción cualitativa o cuantitativa.

En el conjunto de la muestra únicamente el 5% de las respuestas propone una estrategia coherente con un hilo conductor claro para la introducción a la Teoría de la Relatividad lo que pudiera ser achacable al predominio de profesorado en formación en la muestra.

En cuanto al núcleo central de la teoría, los elementos esenciales acerca del principio de relatividad o su estatus en la física está escasamente representado, y el estudio de los sistemas de referencia y el propio principio de relatividad no aparecen sino en un 13 % de las respuestas.

Los aspectos relativos a la constancia de la velocidad de la luz y su constancia, sin más detalles, sólo aparecen en un 5% de las respuestas.

Priman las deducciones más habituales que se derivan los postulados: La configuración del espacio-tiempo, en su faceta más llamativa de contracciones y dilataciones sin excesivas profundización es el concepto dominante.

Conceptos apuntados	% mencion	Sd
Relatividad clásica	21	8
Sistemas de referencia y principio de relatividad	13	7
nociones de espacio tiempo, y modificaciones	33	10
la masa, y relaciones de equivalencia	29	9
constancia de c	8	6
precedentes históricos	21	8
diferencias con la física clásica	4	4

Por otra parte están presentes expresiones y frases que revelan un desconocimiento profundo de los aspectos más básicos de la teoría, por ejemplo, algunas respuestas indican que no se diferencia la relatividad einsteniana, de la clásica; respuestas del tipo: “ Permite hacer distinción entre un hombre que ve pasar un tren y el que viaja dentro” o relacionarla con explicaciones del “movimiento de los planetas....”.

También se dan respuestas, especialmente de los profesores de formación menos física, que la entremezclan con elementos de la teoría cuántica.

2.2	Señala aplicaciones tanto teóricas como prácticas de la relatividad
-----	---

Del estudio de las respuestas se deduce que no se muestra una visión clara de cuales son estos aspectos, se da una amplia dispersión, incluso cerca de un 30% no aportan aplicación alguna.

Conceptos apuntados	% mención	Sd
S. de ref., fenómenos asociados al tiempo y al espacio.	17	8
Equivalencia masa/energía <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Producción de partículas</li> <li>▪ Física nuclear y aplicaciones.</li> </ul>	13 29	7 9
Aspectos asociados a la Astrofísica, (constitución del universo, Big Bang,..)	29	9
Relaciones con campos Física Teórica <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Física de partículas</li> <li>▪ Teoría atómica.</li> <li>▪ Teorías cuánticas</li> </ul>	8 25 46	6 9 10
No señalan ningún tipo de aplicación teórica o práctica.	29	9
Respuestas que revelan aspectos erróneos	25	9

Algunas de ellas muestran una importante confusión:

“...constantemente se hace referencia a algo, esto es lo que constituye la relatividad”.

“...llegar antes a algunos sitios con aviones supersónicos”.

“...estudio de velocidad de masas: movimientos cinéticos”.

“...velocidad de una nave que ha estado circulando años por el espacio”...“La masa que tendría un cuerpo en el espacio”.

2.3 La ecuación  $E=mc^2$  es una de las más conocidas y divulgadas. Cómo la explicarías a los alumnos para intentar que capten su significado.

En la primera categoría se encuentran expresiones directas de interconversión y algunas más indirectas que lo ligan a la superación del principio de conservación de la energía.

Otras son más directas: “ la masa de cualquier cuerpo tiene la capacidad potencial de transformarse en energía”. Esta última versión tiene el interés añadido de su asimetría y la no consideración de masa en reposo.

En cuanto la equivalencia hay un abanico que va desde los que identifican totalmente ambos conceptos, “ son lo mismo” a quien diferencia entre ellos: “ todo cuerpo por tener masa tiene energía asociada”. Este uso de la masa relativista está también incluida en menciones directas a la dependencia de la masa con el sistema de referencia.

<i>Conceptos apuntados</i>	<b>%</b>	<b>Sd</b>
Se dan propuestas de conversión masa energía,.	17 %	8
Se plantea la relación como una vinculación similar a la relación entre la masa y el volumen, con una separación íntima entre los conceptos. En esta categoría se engloban las respuestas que plantean una relación de dependencia funcional (sintetizada en una fórmula) análoga al de la E cinética clásica, sin vinculación de equivalencia.	54 %	10
La respuesta incluye un sustrato físico de equivalencia	21 %	8
Otras en que la respuesta no proporciona una explicación acerca de la equivalencia (incluyendo algunas con deformaciones importantes)	8 %	6

El uso meramente funcional de la expresión está presente en un número elevado de respuestas, sobre todo en aquellas que proponen como estrategia de aprendizaje un cierto operativismo “la explicación detallada de las distintas magnitudes que intervienen en la fórmula”. O relaciones funcionales del tipo si un cuerpo tiene más masa su energía aumenta, que eluden el fondo de la cuestión.

Por último aparecen errores curiosos como quien asimila  $c$  a la velocidad del cuerpo o entremezcla un plano microscópico y dualidad onda-corpúsculo en la explicación.

En resumen tan solo un 21% de las respuestas se puede considerar como satisfactorias, (cerca de un 80% favorables a la hipótesis).

2.4 Valora de 0 a 10 tu grado de acuerdo con las siguientes frases (0 totalmente en desacuerdo, 10 acuerdo total)

Los resultados se recogen en la tabla:

	<b>m</b>	<b>Sd</b>
Se puede prescindir de su conocimiento, en la secundaria.	5,3	1,54
Necesita un alto nivel para comprenderla los rasgos principales	4,8	1,26
Está poco conectada con el resto de lo estudiado en el bachillerato	5,6	1,72
Las fórmulas son complicadas, no ayudan a comprender lo esencial	5,3	1,72

La relativamente alta desviación estándar en la distribución de los resultados indica la elevada dispersión de las respuestas, por lo que no se da una tendencia clara en la valoración de su papel en la enseñanza.

#### 4.4 VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CONTRASTACIÓN DE LA SUBHIPÓTESIS SEGUNDA.

Nuestra hipótesis de partida es la de que el profesorado no mantendrá una visión clara del proceso de elaboración de la teoría ni propondrá un uso significativo del mismo en el proceso de enseñanza-aprendizaje.

**Una vez realizado el análisis de los resultados del cuestionario, y con la cautela derivada de la pequeñez de la muestra, podemos indicar que los resultados apuntan en la dirección propuesta por la subhipótesis segunda.**

#### 4.5 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CONTRASTACIÓN DE LA SUBHIPÓTESIS TERCERA.

Se muestran a continuación los resultados obtenidos de los cuestionarios pasados a los estudiantes, que se han obtenido en contextos diferentes y con un perfil distinto de los alumnos:

Estudiantes de 4º de ESO:	21
Estudiantes de 1º de Bachillerato:	80
Estudiantes de 2º de Bachillerato:	54

### TABLAS DE RESULTADOS Y COMENTARIOS

1º Ideas básicas acerca del espacio	4º ESO		1º Bach.		2º Bach.	
	%Sí	Sd	%Sí	Sd	%Sí	Sd
Manifiesta una concepción apropiada del concepto, mínimamente diferenciado en características y atributos. (Ajustada al nivel: clásico 4º/1º, relativista en 2º Bachiller).	5%	24	19%	11	13%	5

Presenta bastante dificultad precisar la imagen que del espacio poseen los alumnos de primer nivel y la evolución que se ha producido tras el estudio del tema, en el caso de los alumnos de 2º de bachillerato. Los valores cuantitativos que se han fijado no dejan de ser orientativos. El criterio que se ha adoptado para apreciar lo apropiado de la concepción de los alumnos, se ha ajustado

según el nivel que se les presupone a los alumnos conforme a lo que han estudiado.

En torno a un 5% de los alumnos de 4º ESO, y un 19% en 1º bachiller, poseen un concepto clásico del espacio dotado de cierta entidad y enuncian al menos un par de atributos del mismo; se observa poca diferencia entre los de 4º de ESO y 1º de bachiller, pese a que estos últimos han realizado un estudio mucho más amplio de mecánica. En un estudio fino de las respuestas se puede atender a dos aspectos: La forma en que definen el espacio y las propiedades que le atribuyen.

**LAS ACEPCIONES MANEJADAS POR LOS ESTUDIANTES:** Las respuestas pueden ser agrupadas en categorías, según el matiz predominante en su definición, que a veces se entremezclan en las contestaciones; sirva de ejemplo la siguiente en que se presentan juntos las tres vías más habituales de introducir el concepto: *“ El espacio es el recorrido que hace un cuerpo sobre determinada superficie, aunque también se puede llamar espacio al lugar que nosotros ocupamos, o sencillamente, el vacío donde se sitúan las cosas” (1º Bach.)*

- a) El espacio con noción de lugar, o “volumen” donde se sitúan los cuerpos. Este matiz está presente en el 90% de las contestaciones de 4º, el 40% de las de 1º Bachiller, y el 30% de las de 2º.

Esta acepción incluye aquellas respuestas que poseen una vertiente cosmológica de recipientes de cuerpos estelares: *“ Es donde están todos los planetas”*. O comprensivas del tipo *“Todo es el espacio porque todo tiene espacio”*

- b) El espacio como sinónimo de vacío, es una variante en 4º (10%) y 1º Bach(6%) que parece aproximarse a la de lugar.

*“Es el vacío que nos rodea”, “Es el vacío donde nos situamos todos”, “ Es el vacío que existe entre dos puntos u objetos”*

- c) Un numeroso grupo de alumnos hacen referencia al espacio con la acepción de distancia existente en cuerpos reales ( 22% en 1º Bach., y 22% en 2º de Bach.).

En algunas respuestas parece plantearse una dicotomía entre cuerpos y espacio en que este aparece como externo a los cuerpos: ej. *“ Es el lugar que se deja libre entre un objeto o persona y otro objeto o persona....”*

Por otra parte, en una parte sustancial de las respuestas parece necesario definir el espacio en relación a cuerpos o como resultado de relaciones entre ellos: distancias, o exterior a ellos ...Como si se diese cierta dificultad de manejar el propio concepto per se.

- d) Espacio interpretado desde la cinemática como “espacio recorrido” sobre una trayectoria (20% 1º Bach., 19% en 2º de Bach.)

Por ejemplo: *“El espacio es una longitud que puede ser infinita.”* Este tipo de respuestas revelan la falta de un trabajo previo sobre la noción del espacio pues se da más relevancia a la noción cinemática que a la relevancia física del concepto en sí mismo.

e) Por último un porcentaje apreciable no se centra en la cuestión o no contesta (12% en 1º Bach, 11% en 2º Bach)

En 2º BACHILLER el nivel de exigencia aumenta, en tanto que es exigible una superación del concepto clásico en línea a las ideas relativistas; sin embargo, el análisis de las respuestas arroja un 13 % de alumnos que exponen una visión más avanzada del concepto, aunque no muy precisa, favorable a nuestra hipótesis.

En general está asentada la idea de que la posición clásica de Galileo-Newton ha sido superada por las aportaciones einstenianas, otra cuestión es que sean capaces de exponer las nuevas ideas.

Tomemos por ejemplo esta respuesta típica: *“ .... Einstein demostró.... que el espacio no es el mismo para ambos observadores, esta diferencia viene regulada en función de la velocidad, teniendo el límite en la velocidad de la luz. A esto se le llama contracción del espacio”.*

En esta línea hay grados en la respuesta, *“ El espacio no es universal, sino que varía en un factor  $\sqrt{(1 - v^2/c^2)}$ , de un SR. a otro que se mueve con MRU.”.*

Y otro precisa: *“ Este espacio sólo se reduce en la dirección del movimiento”.*

Todas estas respuestas no aciertan en lo esencial: Ya no hay un espacio receptáculo universal de los fenómenos, que si bien puede no ser accesible podemos usarlo indirectamente mediante los sistemas inerciales que se mueven con m.r.u. respecto a él: Hay infinitos espacios igual de válidos, ninguno está contraído respecto a otro, y situaciones análogas proporcionan valores análogos con leyes idénticas. Otra cosa es estudiar el mismo fenómeno físico desde distintos S.R., que proporciona valores diferentes pero unívocos y conectados entre sí por las transformaciones de Lorentz.

En realidad en este y otros de los otros ítems asoma persistentemente la noción de un marco absoluto.

**LOS ATRIBUTOS DEL ESPACIO:** En las respuestas se indican atributos que enriquecen el concepto y que conviene revisar para evaluar su evolución de 4º ESO a 2º de bachiller. La primera conclusión es que muy pocas respuestas 5% en 4ºESO, 19% 1º, 13% en 2º de bachiller exponen alguna de estas propiedades, estos valores son indicativos de que no se ha efectuado un aprendizaje significativo.

Señalemos en primer lugar que los estudiantes de 4º ESO y 1º de bachiller prácticamente no hacen mención a las propiedades clásicas ya reseñados: El

espacio no tiene límites (4º en 4ºESO, 4% en 1ºBach, 7% en 2º), es infinito (10% en 1º, 9% en 2º Bach), completo, homogéneo, continuo, isótropo, universal, pasivo y con la distancia entre puntos invariante. Como se indica sólo alguna de estas propiedades es mencionada en contadas ocasiones. A veces de forma indirecta: *“No tiene dirección, arriba ni abajo, ni derecha ni izquierda”*.

Alguna de las formulaciones parece dotada de un mayor nivel de concreción: *“el espacio es infinito, se puede seccionar en partes y ocupar por distintos materiales”*

En 4º ESO y 1º Bachiller, se percibe en algunos casos (3) la influencia de una formación extracurricular obtenida de los medios de comunicación o de lecturas se observa en referencias a la existencia de un origen del espacio y a la expansión del universo.” Según la teoría del Big-Bang el espacio se hace cada vez más grande y llegará un momento en que se empezará a contraer (4ºESO). Algunas respuestas (3) parecen querer conectar espacio-tiempo, aunque erróneamente, por ejemplo: *“El espacio es un lugar en el tiempo donde se disponen los cuerpos...”*

En conclusión, parece confirmarse nuestra subhipótesis. (S3.1). En efecto, la concepción de los estudiantes de 4ºESO y 1º Bachiller. La imagen de los estudiantes es muy clásica, y asemeja el espacio a un contenedor, escenario de los fenómenos, pasivo, que no interacciona con ellos; pero parece muy poco madurada y se puede inferir que no ha sido objeto de reflexión ni de enriquecimiento. De hecho parece, por el peso de la introducción en términos cinemáticos, que es tan sólo en ese contexto, en 1º de Bachiller, en el que se ha manejado el término espacio. En suma, la base de la explicación es intuitiva, matizada en ocasiones por conocimientos dispersos acerca de la estructura del universo.

Paradójicamente los estudiantes de 2º bachillerato no fijan su atención en estas propiedades y se dedican a resaltar el carácter no universal del espacio y su dependencia con el sistema de referencia. Esto es indicativo de que el aprendizaje se orienta, fundamentalmente, a resaltar la diferencia con las concepciones clásicas sin fundarse en un estudio de la situación problemática de partida ni profundizar en los conceptos. Los resultados son coherentes con nuestra hipótesis.

2º: Ideas básicas sobre el tiempo	4º ESO		1º Bach.		2º Bach.	
	%Sí	Sd	%Sí	Sd	%Sí	Sd
Manifiesta una concepción apropiada del concepto, mínimamente diferenciado en características y atributos. (Ajustada al nivel: clásico 4º/1º, relativista en 2º Bachiller).	15%	8	12%	4	20%	4

El concepto de tiempo presenta una mayor dificultad de verbalización desde los niveles inferiores, lo que se traduce en menores porcentajes de explicaciones que se pueden calificar de suficientemente correctas 15% en 4º ESO, 12% en 1º Bach. 20% en 2º. Esta evaluación se ha realizado de nuevo aplicando criterios de corrección correspondientes a los diversos niveles y a la materia estudiada. El 80% de estudiantes de 2º de bachillerato no son capaces de exponer ideas relativistas más maduras del concepto, lo que favorece nuestra hipótesis (S3.1), lo que no obsta para que enuncien aspectos parciales, alguna propiedad o característica.

Al igual que en la cuestión acerca del espacio, las respuestas pueden ser agrupadas en categorías, según el matiz predominante en su definición: a) Lo introducen mediante referencias a la duración de un fenómeno o repetición cíclica de sucesos 43% de los estudiantes de 4º ESO y el 59% en 1º BACH., mientras que usan esta vía un 30% de alumnos de 2º BACH. Otros, en menor porcentaje recurren a usar para ello un criterio de orden de sucesión de fenómenos. (5% en 4º ESO, 6% en 1º Bach). Algunos, llamativamente, recurren a nociones más metafísicas que muestran su desconcierto ante el concepto: “*No existe como tal es una invención psicológica*” (10% en 4º; 4% en 1º). Por último un porcentaje sustancial no son capaces de definirlo mínimamente, no se centran en la cuestión de contestar sobre lo que es el tiempo o no contestan (43%, 22% y 70% respectivamente). Estos porcentajes no excluye el que contesten enunciando algunas características, pero muestran precisamente la dificultad de abordar directamente el concepto.

Como nota llamativa, un gran número de respuestas incluyen la palabra medir, parece que les resulta difícil concebir el tiempo como parte de una realidad objetiva externa.

En 4º ESO y 1º de bachiller, se pueden detectar como los estudiantes otorgan diversos atributos del espacio entre los que apunta algún eco relativista: “*El tiempo transcurre igual en todo el universo*”; “*El tiempo es simultáneo con el espacio*”; “*El tiempo no está definido en las proximidades de un agujero negro*”, o también, “*El tiempo no es absoluto depende de la velocidad a que te muevas*”

En 2º de bachillerato se producen distorsiones que, con un aspecto aparentemente correcto, encierran errores de concepto, por ejemplo: “*... El tiempo varía en función de la velocidad, como pasa con el espacio a velocidades próximas a la de la luz...*”; o en esta otra “*Einstein descubrió que el tiempo no era igual para todos los observadores, transcurría menos tiempo para un S.R. en MRU que para otro en reposo...*”. Estas respuestas pierden la perspectiva de la igualdad esencial entre el estatus de los distintos sistemas de referencia, e indican que no se ha asumido el concepto de tiempo propio.

Todos los tiempos transcurren igual en todos los sistemas de referencia y fenómenos análogos producen resultados análogos. No se puede argumentar que el tiempo transcurre más despacio en un sistema de referencia ligado a un muón en movimiento que se desintegra, porque en otro sistema en que está en

reposo, el periodo de semidesintegración sea mucho menor (por ejemplo, ligado a la tierra con muones en reposo respecto a ella). Si se evalúa desde la perspectiva del sistema de referencia ligado al muón en movimiento, sería el de la tierra el de mayor periodo. La conclusión es que se está evaluando el mismo suceso pero que para los diferentes sistemas de referencia son dos fenómenos distintos: muón en reposo frente a muón en movimiento. Los tiempos funcionan y transcurren igual en ambos sistemas. En la famosa paradoja de los gemelos la experiencia biológica de cualquiera de ellos no se incrementa ni en un segundo, no prolonga su vida ninguno de los dos; si se mueven en sistemas de referencia inerciales ambos son simétricos y, si en cambio, uno invierte el camino, y se juntan, existirá una diferencia de edad; pero el más viejo habrá experimentado en su vida tantos latidos del corazón como otro hombre de su edad biológica, tendrá vivencias y desgaste físico como la edad que asegura haber vivido.

Los estudiantes de 4º ESO y 1º BACHILLER no recogen un abanico amplio de propiedades del tiempo en la perspectiva clásica. El tiempo clásico se entiende como un parámetro real infinito (5% en 1º), monótonamente creciente (5% en 4ºESO, 3% en 1º), es continuo (5% en 4º, 3% en 1º), homogéneo, isótropo, universal(10% en 4º), pasivo e independiente del espacio. Como se indica de toda esta gama de propiedades no se cita más que un porcentaje mínimo y en muy pocas ocasiones.

En 2º de bachillerato, el abanico de propiedades paradójicamente se estrecha pues se centran en exclusiva en el aspecto relativo del tiempo y se empobrece, incluso más, la presencia de otras propiedades; valoran en cambio mucho las relaciones de Lorentz, que ilustran muchas respuestas. El 61% son capaces de referirse al carácter relativo, no universal del tiempo, diferente según el observador. El aspecto más señalado en 2º es la mención a la evolución desde las nociones clásicas a la relativista pero no son capaces de concretar bien el fundamento del concepto.

En suma los resultados son efectivamente, conformes con las expectativas de la hipótesis, (S3.1) predominan las imágenes del tiempo como duración de fenómenos, con movimientos periódicos, etc. y con muy escaso dominio de sus propiedades lo que apunta a lo superficial del trabajo realizado en torno al concepto.

3º	4º ESO		1º Bach.		2º Bach.	
	%Sí	Sd	%Sí	Sd	%Sí	Sd
<p>Qué son los S.R. ¿Para qué sirven?</p> <p>Manifiesta una concepción apropiada del concepto, Comprende la utilidad de su uso.</p>	19%	9	16%	4	No incluida	
<p>4º Acerca de la existencia S.R. absoluto:</p> <p>Manifiesta una concepción apropiada del concepto y rechazan, con argumentos, la existencia de tal espacio.</p>	0%	0	7%	3	9%	4

La noción de sistema de referencia más correctamente expresada apunta a un sistema cartesiano, de 3 ejes que se cortan en el origen, pero sistemáticamente prescinden del tiempo, como si no se tratase de sistemas de referencia espacio-temporales olvidando que estos se definen en un instante determinado, tampoco los alumnos de 2º de bachillerato hacen hincapié en este aspecto.

El concepto de espacio absoluto no parece ser plenamente comprendido, pues a pesar de usar varios sistemas de referencia y comprender la relatividad del movimiento, todo parece discurrir para ellos en un marco que es la auténtica realidad del espacio.

Un 9 % de estudiantes de 2º de bachillerato, porcentaje muy bajo (91% a favor de nuestras hipótesis) parece haber efectuado el tránsito hacia la intelectualización de este espacio. Si se toma en consideración aquellas respuestas que muestran razonadamente que este concepto queda superado por la teoría de la relatividad este porcentaje bajaría todavía más lo que es muestra del escaso aprendizaje 91% favorable a nuestra hipótesis (S3.H2). Por último hay un porcentaje alto de contestaciones que no se centran en la cuestión o no responden (52% en 4ºESO, 23% en 1º Bach.,24% en 2ºBach.).

Estos resultados parecen apuntar en la línea del interés de trabajar estos conceptos incluyendo en todos los cursos anteriores actividades de complejidad creciente, que introduzcan de forma reflexiva la noción clásica, que es la que esperamos que maneje el estudiante espontáneamente, y ayudar así al tránsito posterior a la concepción relativista.

Conforme a estas ideas podemos asumir que el conjunto de las respuestas apoyan la línea recogida por nuestra hipótesis (S3.H2).

( ESPECÍFICAS DE 4º ESO Y 1º DE BACHILLER)		4º ESO		1º BACH	
		%Sí	Sd	%Sí	Sd
5º	Concepto de trayectoria, estudio de trayectorias desde distintos SR.				
	Establece las trayectorias de forma correcta y manifiesta que ambas son igualmente válidas.	10%	7	22%	5

La cuestión insiste y profundiza en los puntos anteriores al solicitar un uso funcional de las ideas. En primer lugar podemos observar como el mayor nivel de maduración y conocimientos físicos de los alumnos de 1º de bachillerato se hace sentir en que sube al 22% de los estudiantes capaces de distinguir y razonar sobre la presencia de dos trayectorias diferentes, una para cada uno de los sistemas de referencia propuestos, frente a un 10 % de los de 4º de ESO. La descripción correcta de la trayectoria les resulta muy dificultoso y más todavía la consideración de que no hay ninguna trayectoria “verdadera” y

las respuestas en las que se privilegia una sobre la otra son mucho más numerosas.

En suma, podemos afirmar que estos conceptos no están asentados incluso desde la perspectiva clásica en los niveles previos al 2º de bachillerato, lo que sin duda restringirán la flexibilidad de interpretación y las posibilidades de comprensión en 2º, conforme a nuestra hipótesis (S3.H2)

(ESPECÍFICA DE 1º DE BACHILLERATO)		%Sí	Sd
6º	Maneja correctamente la composición galileana de velocidades:		
	a) En la dirección del movimiento:	31%	5
	b) En dirección perpendicular al movimiento.	12%	4
	c) Una composición que involucra la velocidad de la luz.	6%	3

Una última vertiente analizada en torno a los sistemas de referencia es el manejo cuantitativo de la transformación de velocidades de Galileo. El 69 % de alumnos que no consigue efectuar correctamente composiciones sencillas de velocidades en la dirección de movimiento, porcentaje que aumenta drásticamente al 88% si se solicita una composición transversal, (de hecho el porcentaje de alumnos que no contestan a esta cuestión asciende del 37% en dirección del movimiento al 48% en dirección transversal). Estos valores son indicativos de las dificultades adicionales que les representa manejar situaciones asimétrica, direcciones transversales y operaciones de composición vectorial.

Por último, en torno a la velocidad de la luz se observa que algunos alumnos si que conocen la existencia de peculiaridades en ella (12%), muchos son desbordados por la pregunta (58% no responden a este punto), algunos la componen sin atender a ninguna peculiaridad, Intentan sumar la  $V_{luz} + V_{nave}$  (14 casos). Pero también es de destacar en este nivel la existencia de casos (3) en que no sólo realizan bien la composición con la luz, sino que lo explican perfectamente: *“la luz no puede ir más rápido”*.

En conclusión los resultados apoyan firmemente la necesidad de un trabajo previo más cuidadoso en su faceta más práctica, además de la reflexión de su base teórica y resultan ser favorables a nuestra subhipótesis (S3.H2).

(ESPECÍFICA DE 1º DE BACHILLERATO)		%Sí	Sd
7º	Manifiestan razonadamente la existencia de limitaciones en la validez de la mecánica que surgió tras los trabajos de Galileo, Newton...	13%	5

La cuestión pretendía sacar a la luz la consideración, que en el marco de la Física concedían los estudiantes a los fundamentos de la mecánica clásica, y de paso lo plausible que resulta para ellos la existencia de limitaciones al marco teórico. En ese sentido los resultados son un tanto ambiguos, por un lado hay un porcentaje importante (51%) de alumnos de 4º y 1º de bachiller que admiten la existencia de limitaciones, pero un análisis fino de sus respuestas revela que:

1º Parecen carecer del concepto de estructura teórica fundamental y organizada asentada y cuyo cambio supone una alteración de los fundamentos de la disciplina. Es decir, no atribuyen especial jerarquía al núcleo fundamental.

2º Un alto número de respuestas admiten un cambio progresivo y continuo de mejora indefinida, difuminándose, y relativizándose en exceso el valor del conocimiento científico; posiblemente encuentran dificultades en valorar los fenómenos de cambio crítico.

En relación a estos puntos se pueden extractar algunas respuestas a modo de ejemplo:

*“...Nada es exacto, puesto que cada vez salen nuevas teorías, que amplían o contradicen las anteriores.....”*

3º No se percibe que los estudiantes hagan uso de una noción suficientemente clara de diferenciación entre los aspectos de modelización y de aproximación que surgen del uso práctico de la teoría, y de validez o invalidez de naturaleza teórica. De ahí el relativamente alto número de respuestas que muestren esa confusión:

*Tienen límites en su validez debido a que muchas veces considera el rozamiento igual a cero y muchos cuerpos se encuentran afectados por el rozamiento”.*

Junto a afirmaciones que restringen de forma errónea su validez: *“...Tiene límites porque en el espacio no sirven al no haber gravedad....”.*

Tan sólo un número muy reducido número de alumnos muestran conocer la existencia de limitaciones de orden más fundamental, en la teoría, (13%) señalando algún punto de interés: *“...No exacta porque si aumentas mucho hasta la velocidad de la luz la masa valdría cero...”* O también: *“Está limitada a unas velocidades que no se aproximan a la velocidad de la luz y por ello se tuvo que utilizar la de Einstein”*

En suma lo que revela este ítem es la carencia de un estudio e interiorización de aspectos lógicos de la ciencia y la ausencia de este planteamiento en el trabajo sobre la mecánica clásica; en consecuencia no podemos considerar plenamente acertada la subhipótesis (S3.H1) en este caso, pero por una limitación más fundamental todavía.

(DESTINADA A ALUMNOS DE 2º DE BACHILLERATO)		%Sí	Sd
4º	Indica los puntos esenciales de la Relatividad especial	32%	6

La cuestión ha sido planteada únicamente para los estudiantes de 2º de bachiller, solicitaba a los estudiantes que formularan los puntos que consideraban esenciales en la Relatividad. Se ha adoptado como criterio de corrección que señalen al menos dos de las características más esenciales.

Del estudio de los resultados se deduce que hay una dispersión de respuestas, fruto de la mención de los aspectos más llamativos para los estudiantes, y falta de fijeza en lo esencial. Un 30% de los estudiantes no son capaces de indicar algún punto esencial, o no se centran en ningún aspecto relevante, otro 26% destacan como aspecto más relevante el uso de masa relativista. Otro 7% indica como tal la equivalencia masa/energía.

Entre los puntos más apuntados por los estudiantes se indican, por ejemplo, la velocidad de la luz como límite físico que es citada como punto esencial por 22% de los alumnos. Esto pudiera ser debido a que falta la referencia a un hilo conductor didáctico como el que propone el proceso de enseñanza por investigación: (Partir de una situación problemática de partida reflexionada y un proceso lógico de introducción guiada de conocimiento, en línea con la investigación científica). De hecho, el punto central del principio de relatividad es citado por el 24% de las respuestas, porcentaje sumamente bajo, lo que resulta ser favorable, con el 76%, a nuestra hipótesis de partida (S3.H3). Las nociones básicas de espacio se mencionan con una explicación acerca de su papel. 37% y el concepto de simultaneidad y la nueva concepción del tiempo el 31%.

Junto a este abanico de respuestas se dan algunas muy dispersas que incluso confunden fenómenos diversos fuera del ámbito relativista (dualidad, efecto fotoeléctrico, etc.).

5º	Manejan de forma correcta el concepto de tiempo propio.	19%	5
----	---	-----	---

En el estudio del ítem acerca de la duración de dos fenómenos idénticos, en dos sistemas de referencia en movimiento rectilíneo uniforme entre sí, se obtiene la siguiente distribución de respuestas:

Se obtiene igual duración (resultado correcto)	19%	4
Resultado incorrecto	77%	5
No contestan	4%	3

Resultan correctos solo el 19 % de los resultados, lo que es indicativo de que la idea del tiempo propio no ha calado suficientemente entre la mayoría de los estudiantes (81% favorable a nuestra hipótesis).

Hay un reparto equilibrado entre las respuestas de mayor (37%) y menor duración (40%). El tipo de respuestas incorrectas son por ejemplo: “... *En la pila que ha viajado a una velocidad cercana a la de la luz el tiempo ha transcurrido más despacio, se produce lo que llamamos una dilatación del tiempo.*” . El estudiante se ha dejado arrastrar por la medición efectuada desde un sistema sobre el otro y no por la autoevaluación que realiza el otro sistema, que no puede sino ser idéntica a la suya propia, so pena de privilegiar uno sobre otro.

Se detecta también una importante presencia de la expresión  $\Delta t' = \Delta t / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$  escrita en (37 %) de los casos, utilizada en un sentido u otro para argumentar tiempos mayores o menores. El estudiante se apoya en un operativismo que no es de aplicación al caso.

Por último es de destacar que hay un 19% de las respuestas que indican que han comprendido perfectamente la pregunta y argumentan correctamente, lo que permite concluir que se manejan conceptos perfectamente asequibles con un trabajo bien orientado.

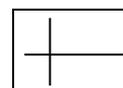
En suma de la exposición realizada se puede considerar que el aprendizaje realizado por la generalidad de los alumnos dista de ser suficientemente significativo conforme se propone en la hipótesis (S3.H1).

6º Responder correctamente acerca de la medida de la longitud de cuerpos asimétricos en movimiento.	34%	5
---	-----	---

El ítem indagaba acerca del manejo asimétrico de la contracción y la complejidad de alejamiento/ acercamiento, permitiendo la elección entre tres opciones.

	%	Sd
Contestan correctamente. (Se aleja con velocidad V).	34%	7
Eligen una opción incorrecta	59%	5
No contestan.	7%	3

Hay un porcentaje sustancial de respuestas 59 %, que no aciertan a diferenciar las transformaciones geométricas cuando se solicita evaluar situaciones no evidentes. Lo que es indicativo de que no se ha insistido en la asimetría entre las direcciones, ni el hecho de que es indiferente si se trata de un acercamiento o alejamiento en una dirección. Curiosamente



alguna respuesta propone incluso soluciones aberrantes, por ejemplo:

Este elevado porcentaje actúa favoreciendo la hipótesis (S3.H1).

7º	Proporciona una opinión correcta acerca del uso de la sustituyendo $m$ por $= m_0 / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$ . en las expresiones dinámicas	15%	5
----	---	-----	---

El porcentaje de alumnos que identifican el problema y eluden extender la expresión de forma indiscriminada al resto de fórmulas es muy pequeño, el 15%. Abundan, por el contrario, posiciones erróneas, e incluso son más numerosas las que no se definen, 44%.

Un 41% incurren directamente la traslación de la fórmula a las expresiones clásicas, lo que es indicativo de que constituye una fuente sustancial de error e indirectamente favorece nuestra hipótesis,(S3.H1) por ejemplo: “ *...Las fórmulas más conocidas nos ayudan a acordarnos de otras más complicadas, y esto es un buen método para ayudarnos a estudiarlas, como es el caso de la masa relativista...*” En esa misma línea razona más adelante: “ *...Cuanto mayor sea la masa mayor será la velocidad de la partícula, de modo que cuanto más se aproxime a la velocidad de la luz la masa se irá haciendo infinita. Esto lleva a que la fuerza irá siendo mayor cuanto mayor sea la masa, según la ley de Newton*”.

8º	Proporciona una explicación correcta del significado de la ecuación $E=mc^2$ , manejando la masa invariante.	19%	5
----	--	-----	---

Interpretaciones adoptadas como correctas que manejan  $E_0= m c^2$ , asumiendo la masa en reposo como masa de la partícula y  $m$  como única masa se produce en el 19% de ocasiones, es decir siguen una interpretación basada en la equivalencia energía y masa (en reposo).

La interpretación de la ecuación usando la masa relativista se produce en 41 % de las veces, opción que resulta ser mayoritaria.

Junto a estas respuestas se dan otras que se limitan a la lectura funcional de la fórmula análoga al de la energía cinética clásica, sin vinculación de equivalencia, que sería arriesgado encuadrar en alguna de las otras categorías, y que apuntan hacia una inferior comprensión. Podemos ilustrar estas posiciones con respuestas del tipo: “ *Que la energía es directamente proporcional a la masa y que si hiciéramos una gráfica variarían linealmente*”, lo que indica una simple transcripción gráfica de la fórmula analítica.

Finalmente la respuesta (en un 15% de los casos) no proporciona una explicación o incurren en deformaciones importantes.

Entre las respuestas de difícil clasificación podemos indicar a las que hacen referencia a los fotones: *“ Es la energía de un fotón y se obtiene multiplicando la masa del fotón por la velocidad de la luz”*.

Este tipo de respuestas se podrían haber incluido como próximas al uso de la masa relativista, pero la asignación inicial de masa al fotón, la sitúan a nuestro juicio en el campo de las deformaciones.

Algunas deformaciones son muy graves pues cuando incurren incluso en la negación de postulados básicos, por ejemplo: *“ La ecuación significa que cuanto mayor sea la velocidad de la luz, mayor será la energía que posea esa masa, ya que cuanto más aumenta la velocidad de la luz más aumentará su masa y por lo tanto su energía...”*.

En conclusión los resultados de la cuestión apoyan un uso amplio del concepto de masa relativista (subhipótesis S3.H4) además de revelar un aprendizaje de los conceptos en términos generales muy superficial y poco significativo.

9º	Razona correctamente acerca de la energía de los procesos nucleares de fisión.	22%	6
----	--	-----	---

Los razonamientos son en general bastante confusos, y tan solo un 22%, se pueden conceptualizar como suficientemente correctos; lo que indica las dificultades que presenta este punto. Se puede precisar más y obtener más información, clasificando las respuestas en categorías:

- Usan razonamientos de interconversión masa/energía (15% de respuestas).

En esta categoría se pueden encuadrar respuestas del tipo: *“ No toda la masa del átomo compone la masa de la suma de los fragmentos. Aplicando la ley de conservación se deduce que esa masa desintegrada supone una energía liberada”*.

La interpretación iría en la línea:  $m - \sum m_i = \Delta m = E_{\text{liberada}}/c^2$ . en que las masas son siempre referidas a masas en reposo del átomo y los fragmentos.

Ejemplos de razonamientos de interconversión son: *“..energía aumenta cuando la masa disminuye, por tanto la igualdad se conserva. La pérdida de esta materia es la que nos aporta dicha energía”*.

Las apelaciones a la conservación de la energía en ocasiones encubren una falta de explicación acerca del origen de la energía: “ *Esto se debe al principio de conservación de la energía*”.

- Manejan esquemas o modelos mecánicos incorrectos (11%)

Hay explicaciones que ubican la energía según esquemas mentales de recipiente, en que la energía se libera al romperse el átomo: “ *Lo que ocurre es que el uranio debido a su masa tiene una gran energía interna según la ecuación  $E= mc^2$  y al romperse libera toda esa energía que tenía en su interior 200 MeV*”. En esa línea se orientan otras respuestas:” *Debido al principio de conservación de la energía el núcleo de uranio tiene energía interna que al realizar en él una fisión sale al exterior...*”.

- No comprenden la variación de masa que se produce (7% de las respuestas)

Hay respuestas que parecen indicar que el estudiante no comprende la pérdida de masa, algunos la achacan a la fisión: “...*Cuando se rompe la masa se divide en dos y por lo tanto pierde masa ya que la masa total se reparte en dos.* “. Respuestas de este tipo no asumen  $\Sigma m_f - \Sigma m_i$

- No proporcionan una respuesta o es errática en el 30 % de los casos.

Por último, hay un sector importante que contesta con normalidad al resto de las cuestiones y, en cambio no aventura ninguna explicación 30 %.

Todos estos resultados trazan un cuadro coherente con nuestra subhipótesis (S3.H4)

#### **4.6 VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CONTRASTACIÓN DE LA SUBHIPÓTESIS TERCERA.**

Esta tercera subhipótesis es esencial por cuanto hace referencia al fin último del proceso de enseñanza aprendizaje; la cuestión esencial radicaba en investigar si la enseñanza recibida da lugar a un aprendizaje significativo y estable en los estudiantes. Esta subhipótesis ha sido puesta a prueba mediante el correspondiente desglose en subhipótesis operativas, que son la base del diseño realizado.

**Una vez estudiados los resultados del cuestionario, podemos afirmar que los resultados confirman nuestras suposiciones, que el aprendizaje ha sido poco efectivo y que los alumnos finalizan su enseñanza de la relatividad sin comprender satisfactoriamente los principales conceptos.**



## 5 CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

En el primer capítulo se ha planteado el problema de la enseñanza de la relatividad, se han analizado las características del problema y los principales debates en torno al mismo. Para la investigación de este problema, en el capítulo dos se ha formulado una hipótesis orientada a su clarificación y que se formuló de la siguiente forma:

**Los conceptos de tiempo, espacio y sus propiedades, así como los distintos sistemas de referencia, se introducen ya desde los niveles inferiores de la secundaria de forma desestructurada, acrítica y poco reflexiva. La enseñanza de la Teoría de la Relatividad se realiza de forma poco clarificadora, sin tener en cuenta las preconcepciones de los alumnos, y sin resaltar su posición en la estructura de la Física. En consecuencia, el aprendizaje es escasamente significativo y no se consolidan las nuevas concepciones en los estudiantes.**

La hipótesis se ha fundamentado didácticamente recurriendo a las aportaciones de la comunidad científica sobre el proceso de enseñanza-aprendizaje y, más en detalle, sobre los principales conceptos involucrados.

Con objeto de contrastar la hipótesis se ha realizado un desglose en tres subhipótesis principales, que a su vez se han operativizado para favorecer su contraste, y elaborado un diseño convergente y variado que se ha aplicado a los principales variables del proceso: alumnos, profesores y libros de texto. Se ha aplicado sobre 30 textos de amplia difusión, entre ellos los más difundidos en la enseñanza de la Física de 2º de bachillerato. También se han pasado cuestionarios a profesores para lo que se ha contado con la colaboración de 36 profesores en activo o en formación y, finalmente, se han pasado 155 cuestionarios a alumnos para indagar el aprendizaje derivado de la enseñanza recibida.

### 5.1 CONCLUSIONES:

Del estudio de los instrumentos desarrollados podemos fijar las siguientes conclusiones:

**1.- Los libros de texto utilizados los niveles inferiores de la secundaria no presentan adecuadamente los conceptos de tiempo y espacio. En el 2º de bachillerato la enseñanza de la Teoría de la Relatividad se plantea de forma poco clarificadora, sin tener en cuenta las preconcepciones de los alumnos, y sin resaltar su posición en la estructura de la Física.**

Se apoya esta afirmación en datos tales como que el estudio del principio de relatividad galileano no se realiza en más del 80 % de los textos de primer nivel, o que en los textos de segundo de bachillerato se da una importante

dispersión en la introducción, o no, de conceptos como la masa relativista (presente en el 82% de los textos) y muy diversos y contradictorios enfoques sobre su significado.

**2.- La práctica habitual no favorece un aprendizaje significativo, los profesores introducen, de forma, acrítica y poco reflexiva los conceptos, desde orientaciones epistemológicas distorsionadas y sin contar con los resultados de la investigación didáctica.**

Estas conclusiones se deducen del estudio de las respuestas de los profesores que solo plantean la necesidad de partir de una situación problemática en el 30% de los casos, sin una epistemología adecuada en un 72% de casos y con dificultades de entresacar lo sustancial de la teoría manejar aplicaciones de la relatividad o razonar adecuadamente sobre la masa, incluso con un 17% que razonan en términos de conversión masa energía, etc.

**3.- Los alumnos, como consecuencia de la enseñanza recibida, muestran un aprendizaje escasamente significativo y se consolidan poco las nuevas concepciones en los estudiantes”.**

Esta conclusión se extrae directamente de la escasa comprensión sobre conceptos básicos, por ejemplo como muestra se puede indicar que una concepción correcta del espacio, en la perspectiva relativista, no es alcanzada por más del 13% de los estudiantes; el manejo de conceptos como el de tiempo propio no se realiza correctamente por el 81% de los estudiantes, un 68 % no señala los puntos esenciales de la relatividad o que el 78% no es capaz de razonar adecuadamente acerca de la energía en procesos tales como la fisión nuclear.

## **5.2 PERSPECTIVAS**

La enseñanza de la relatividad en el bachillerato fue incorporada de la mano de la reforma de educativa diseñada por la LOGSE, por esta razón su presencia y extensión está sometida todavía a los vaivenes de la consolidación del nuevo bachillerato y sus sucesivas reformas. Su presencia actual podría alterarse en el futuro, por ello cobra interés proseguir una investigación de las peculiaridades de su enseñanza, en dos escenarios posibles: En un caso como una experiencia limitada en el tiempo o, en otro, como un campo de innegable dificultad e interés con continuidad.

Justificada de esa forma la utilidad de proseguir este estudio, cabe iniciar la tarea por una ampliación y afianzamiento de este trabajo, tanto en el afinamiento de las hipótesis como en el refinamiento de los instrumentos (por ejemplo con entrevistas, otros cuestionarios, etc.) e incrementar el tamaño de las muestras.

Por otra parte, pudiera ser interesante indagar en la zona fronteriza con los primeros niveles de la enseñanza universitaria, en ese caso se podría profundizar en aspectos cuya complejidad y extensión exige una mayor madurez y que adicionalmente iluminarían estrategias transferibles hacia la secundaria.

En la perspectiva de su continuidad en los programas, cabe plantear una segunda fase que consista en la elaboración de una propuesta alternativa que incida en los puntos puestos de manifiesto en este trabajo y en línea con el proceso de enseñanza por investigación que se sostiene.

Se cierra pues este trabajo, dejando abierta la necesidad de esta segunda fase y que sería materia de una tesis doctoral.



## **6 ANEXO: libros de texto revisados**

### **2º DE BACHILLERATO**

ANDRES, D.M.; ANTÓN, J.L.; BARRIO, J. y CRUZ, M.C., (1998), *Física 2º Bachillerato*. Madrid: Editex.

ENCISO,E. ; SENDRA; F. y otros (1998) *Física*, Valencia: ECIR,.

FIDALGO, J.A.; FERNÁNDEZ, M. (1998). *Física*. León: Everest.

GALINDO,A. y otros. (1998). *Física 2*. Madrid: Mc Graw Hill.

GISBERT, M.; HERNÁNDEZ, J.L. (1998) *Física 2º Bachillerato*; Madrid: Bruño.

LARA, C.; PUENTE, J. y ROMO, R. (1997); *Física de Bachillerato*. Madrid: S.M.

MARTÍN, J. y FRAILE, J. (2001). *Física 2*. Madrid: Santillana.

PEÑA, A. y GARCÍA, J. (1996). *Física 2*. Madrid: Mc Graw Hill.

ROVIRA,J.A. ; CASTELLANO,C. GARCÍA,T; MURGÍA, L. (1999). *Física 2º*. Barcelona: Edebé.

SATOCA, J; TEJERINA, F, y DALMAU,F. (1998), *Física 2*. Madrid: Anaya.

SOLBES, J. y TARÍN,F. ( 1996) *Física 2 de Bachillerato*. Barcelona: Octaedro.

### **1º DE BACHILLERATO**

AGUSTENCH, M.; DEL CASTILLO, V.; DEL BARRIO, J. y ROMO, N.; (1997); *Física y Química*. Madrid: S.M.

ANDRÉS, D.; ANTÓN, J.L.; BARRIO,J. DELACRUZ,M.C. y GONZÁLEZ,F. (1999) *Física y Química I*. Madrid: Editex.

CALATAYUD, M. L. ; HERNÁNDEZ, J. ; SOLBES, J. y VILCHES, A. ( 1997) *Física y Química 1º de Bachillerato*. Barcelona: Octaedro.

CARRASCOSA, J.; MARTÍNEZ,S. ; MARTÍNEZ, T. ; ( 2000), Nova, *Física y Química*. Madrid: Santillana.

Dou, J.M.; MASJUAN;M.D. ; PFEIFFER,N y TRAVESSET,A. (1999) *Física y Química 1º de bachillerato*. Barcelona: Casals.

FERNÁNDEZ, R.; DE LA PEÑA, L.; HERNÁNDEZ, J.L. y LOZANO, A. (2000). *Fotón1: Física y Química*. Barcelona: Vicens Vives.

FERNÁNDEZ, R.; DE LA PEÑA, L.; HERNÁNDEZ, J.L. y LOZANO, A. (2000). *Eurema 1: Física y Química*. Barcelona: Vicens Vives.

FIDALGO, J.A.; FERNÁNDEZ, M. (1998) . *Física y Química*. León: Everest.

GALINDO,A. ; SAVIRÓN; MOREN,A. PASTOR,J. Y BENEDÍ, A. (1995) Madrid: Mc Graw Hill.

GARCÍA POZO, T.; CANTOS, M.; GARCÍA-SERNA,J.R; RODRÍGUEZ, J. ( 1998). *Física y Química* . Barcelona: Edebé.

MARTÍN, J.; FRAILE, J. y ALONSO, A. (1996). *Física y Química*. Madrid: Santillana.

MORALES, J.V.; ARRIBAS,C.J. y Sánchez, J.M. (2000). *Física y Química*. Zaragoza: Edelvives.

ONTAÑÓN, G. y ONTAÑÓN, E.; (1998); *Física y Química 1º de Bachillerato*. Madrid: Bruño.

PEÑA, A.; POZAS, A.; RODRÍGUEZ, A.; GARCÍA, J.; MARTÍN y R.; RUIZ, A. (1998). *Física y Química 1*. Madrid: Mc Graw Hill.

SATOCA, J.; TEJERINA,F. y DALMAU, F.; (2000). *Física y Química*. Madrid: Anaya.

#### **4º de E.S.O**

SENDRA,F.; ENCISO.E; CHORRO;F. y GARCÍA, M.; (1996). *Física i Química*. Valencia: Ecir.

HIERREZUELO,J (Coord) y otros; ( 1993). Ciencias de la Naturaleza: *Física y Química 4º*. Granada: Elzevir.

GARCÍA, T. y otros. (1997). *Física y Química 4º ESO*. Barcelona: Edebé

LLORENS,J.A. ( 1999) *Física y Química 4º ESO* Valencia: Tabarca.

MARTÍN, J.; RUIZ,E. ; FRAILE, J. y otros.(1998). *Física y Química, Secundaria 2000*. Santillana: Madrid.

ESPAÑA,J. ; LÓPEZ, V. MORALES, J.L. y ARRIBAS, C. (2000). *Física y Química*. Zaragoza: Edelvives.

PASTOR, J.M. BOIXADERAS,N. (1999). Entorn 4 Física i Química. Barcelona: Vicens Vives.

## 7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADLER, C.G.(1987), Does mass really depend on velocity, dad? *American Journal of Physics*, 55(8) pp. 739-743.

ALEMÁN,R.A. (1997): Errores comunes sobre relatividad entre los profesores de enseñanza secundaria. *Enseñanza de las ciencias*. Vol. 15, N 3, pp. 301-307.

ALEMAÑ, R.A.,(2000), Enseñanza por cambio conceptual: De la física clásica a la relatividad *Enseñanza de las ciencias*. Vol. 18, N 3, pp. 463-471.

ALONSO SÁNCHEZ, Manuel. (2000). Diagramas posición-tiempo para enseñar relatividad en el bachillerato. *Alambique*, Num. 23, año VII, pp.109-117.

ALONSO Y FINN (1970). *Física*. Fondo Educativo Interamericano: Bogotá

ANGOTTI, J.A. , CALDAS, I.L. et alt (1978) Teaching relativity with different phylosophy. *American Journal of physiscs*. Vol 46, pp 1258-1262.

ARONS, A.B., (1970), Evolución de los conceptos de la Física. Mexico: Trillas.

AUSUBEL, D. P., 1978. *Psicología educativa. Un punto de vista cognoscitivo*. México:Trillas.

BAUMAN, R.P., 1992a, Physics that Textbooks Writers Usually Get Wrong-I. Work, *The Physics Teacher*, 30, 264-269.

BAUMAN, R.P., 1994, Mass and Energy: The Lower-Energy limit, *The Physics Teacher*, 1994, 32, 340-342.

BERKSON, W., (1981), *Las teorías de los campos de fuerza*. Madrid: Alianza Universidad.

BICKERSTAFF, R.P. y PATSAKOS, G., 1995, Relativisty generalizations of mass, *European Journal of Phisiccs*, 16, 63-66.

BORCHI, L. ; DE AMBROSIS,A. , y GHISOLFI,E. (1993) Theaching special relativity in high school. In Novack, J. : *Proceedings of the Third International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics*. Ithaca, New York. Ciornell University ( Distribuc. electrónica)

BRISCOE,C., (1991) The dynamic interactions among beliefs, role methaphores and teaching practices. A case study of teacher change. *Science Education*, 75(2), pp 33-34

BUNGE, M., (1983), *Controversias en Física*. Madrid: Tecnos.

- CAMPANARIO, J.M. (2000) "El desarrollo de la metacognición en el aprendizaje de las ciencias: estrategias para el profesor y actividades orientadas al alumno". *Enseñanza de las ciencias*, 2000, 18 (3). pp. 369-380.
- CARRASCOSA, FURIO, GIL Y MARTÍNEZ TORREGROSA, 1991: "Enseñanza de las Ciencias en la Educación Secundaria". Barcelona: Horsori.
- CARRASCOSA, J. 1983: Errores conceptuales en la enseñanza de la Ciencias. *Enseñanza de las Ciencias. Vol.1 nº 1*.
- CARRASCOSA, J., 1987, *Tratamiento didáctico en la enseñanza de las ciencias de los errores conceptuales*. Tesis doctoral. Universidad de Valencia.
- CARSON, S. (1998). Relativistic mass. *Physics Education*. 33(6) pp. 343-345
- CATALÁN, A. y CATALANY, M., (1986). Contra el mito de la neutralidad de la ciencia: el papel de la historia, *Enseñanza de las ciencias*, Vol. 4. Nº 2. pp 163-166.
- COLOMBO DE CUDMANI, L. (1991). La generación autónoma de conflictos cognitivos para favorecer cambios de paradigmas en el aprendizaje de la Física. *Enseñanza de las Ciencias*, vol. 9 N. 3, pp 237-242.
- COLOMBO DE CUDMANI, L. (1995). Distintos tipos de constantes en Física y aprendizaje significativo de la disciplina. *Enseñanza de las Ciencias*, vol. 13 N. 2, pp 237-248.
- CROMBIE, A.C., ( 1959), *Historia de la Ciencia: De San Agustín a Galileo*. Madrid: Alianza.
- DOMÉNECH CARBÓ, A. (1998). El debate sobre la masa relativista: El problema definicional y otros aspectos epistemológicos. *Enseñanza de las ciencias*, 1998, 16 (2). pp. 331-339.
- DOMÉNECH, A., (1985), *Aproximación al estudio de espacio y tiempo*. Valencia: ICE Universidad de Valencia.
- DOMÉNECH, A., DOMÉNECH, T y otros (1985). El espacio tiempo clásicos y el espacio tiempo de la relatividad especial. *Enseñanza de las ciencias*, Num. extra pp 72.
- DRIVER R., GUESNE, E. y TIBERGHIE, A., 1992, *Ideas científicas en la infancia y la adolescencia*. Madrid: Morata y M.E.C..
- DRIVER, R. (1986). "Psicología cognoscitiva y esquemas conceptuales de los alumnos". *Enseñanza de las Ciencias*. Vol.4 nº1.
- DRIVER, R. y OLDHAM, V. 1986: *A constructivist approach to curriculum development in science*. *Studies in Science Education*, 13

- DRIVER, R. y WARRINGTON, L., (1985), Students' use of the principle of energy conservation in problem situations, *Physics Education*, 20, 171-176.
- DUIT, R, (1981), Understanding Energy as a Conserved Quantity-Remarks on the Article by R. U. Sexl, *European Journal of Science Education*, 3 (3), 291-301.
- DUIT, R., (1984), Learning the energy concept in school-empirical results from The Philippines and West Germany, *Physics Education*, 19, 59-66.
- EINSTEIN, A. (1984). Sobre la teoría de la relatividad especial. Madrid: Alianza.
- EINSTEIN, A. (1986). Contribuciones a la ciencia. Barcelona: Orbis.
- EULER L., (1985). Reflexiones sobre el espacio, la fuerza y la materia. Alianza: Madrid,
- FADNER, W.L., (1988), Did Einstein really discover "  $E= mc^2$ ".?, *American Journal of Physics*, 56 (2), 114-122.
- FEYNMAN, R.P., LEIGHTON, R.B. y SANDS, M., 1969, *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. I, II y III, Addison-Wesley: Reading, Massachusetts.
- FRENCH, A.P, 1991. *Relatividad especial*. Barcelona: Reverte.
- FURIÓ, C. y GIL, D., 1978, *El programa-guía: una propuesta para la clase activa*. Valencia: ICE. Universidad de Valencia.
- FURIÓ, C., (1994), Tendencias actuales en la formación del profesorado de ciencias. *Enseñanza de las ciencias*, vol 12. N2. pp. 188-199.
- GALILI, I. y KAPLAN, D., 1997, Extending the application of the relativity principle: Some pedagogical advantages, *American Journal of Physics*, 65 (4), 328-335.
- GALLEGOS, J.A. (1992) Errores conceptuales en geología: los conceptos de isotropía, anisotropía y propiedad escalar - propiedad vectorial. *Enseñanza de las ciencias*. Vol. 10 N.2 pp 159-164.
- GETTYS, W.E., KELLER, F.J. y SKOVE, M.J.,(1993), *Física*, McGraw-Hill: Madrid.
- GIANCOLI, D.C., 1984, *Física General*, Vol. 2, Prentice-Hall Hispanoamericana: México.
- GIL, D. 1982: "La investigación en el aula de Física y Química". (Anaya.Madrid).
- GIL, D. 1983: "Tres paradigmas básicos en la enseñanza de las Ciencias". Enseñanza de las Ciencias 1.
- GIL, D. y CARRASCOSA, J. 1985a: *Science learning as a conceptual and methodological change*. *European Journal of Science Education* 7, (3).

- GIL, D. y CARRASCOSA, J. 1985b: “La metodología de la superficialidad y el aprendizaje de las Ciencias”. Enseñanza de las Ciencias 3.
- GIL, D. y MARTÍNEZ TORREGROSA, 1987: “La resolución de problemas de Física” (MEC Vicens-Vives: Madrid)
- GIL, D. y MARTÍNEZ TORREGROSA, J., 1983, A model for problem solving in accordance with scientific methodology, *European Journal of Science Education*, 5, 447-455.
- GIL, D. y MARTÍNEZ TORREGROSA, J., 1987, *La resolución de problemas de Física*, M.E.C: Madrid.
- GIL, D. y PAYA J., 1988: “Los trabajos prácticos de Física y Química y la metodología Científica”. Revista de Enseñanza de la Física.
- GIL, D. y PAYÁ, J.(1982). La introducción de conceptos, modelos y teorías en los textos de Física. *Enseñanza de las Ciencias*. Num extra, tomo 1, pp 203-204.
- GIL, D. y SOLBES, J., 1993, The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science, *International Journal of Science Education*, 15 (3), 255-260.
- GIL, D. y VALDÉS, P., (1995), Contra la distinción clásica entre “Teoría”, “prácticas experimentales” y “resolución de problemas”: El estudio de las fuerzas elásticas como ejemplo ilustrativo. *Didáctica de las ciencias experimentales y sociales*. 9, pp 3-25.
- GIL, D. y VALDÉS, P., (1996), La orientación de las prácticas de laboratorio como investigación: Un ejemplo ilustrativo. *Enseñanzas de las ciencias*. vol. 14 N 2. pp 155-164.
- GIL, D., y SOLBES, J. (1993). The introduction of modern physics: Overcoming a deformed vision of science. *International Journal of Science Education*. 15, 3, pp 225-260.
- GIL, D., 1983, Tres paradigmas básicos en la enseñanza de las ciencias, *Enseñanza de las Ciencias*, 1, 26-34.
- GIL, D., 1986, La metodología científica y la enseñanza de las ciencias: unas relaciones controvertidas. *Enseñanza de las Ciencias*, 4 (2), 111-121.
- GIL, D., 1993, Contribución de la historia y de la filosofía de las ciencias al desarrollo de un modelo de enseñanza/aprendizaje como investigación, *Enseñanza de las Ciencias*, 11 (2), 197-212.
- GIL, D., FURIÓ, C. y CARRASCOSA, J., (1994), *Proyecto de formación continua de profesores de ciencias a través de la televisión educativa iberoamericana*, Valencia.

GIL, D., SENENT, F. y SOLBES, J., 1986, Análisis crítico de la Física moderna, *Revista de Enseñanza de la Física*, 2, 16-21.

GIL, D., SENENT, F. y SOLBES, J., 1988,  $E = mc^2$ , la ecuación más famosa de la física: Una incomprendida, *Revista Española de Física*, 2 (2), 53-55.

GIL, D., SENENT, F. y SOLBES, J. (1986). Análisis crítico de la introducción de la Física Moderna en la enseñanza media. *Revista de Enseñanza de la Física*, 2, pp. 16-21.

GIL, D., SENENT, F. y SOLBES, J. (1986). La introducción a la Física Moderna: Un ejemplo paradigmático de cambio conceptual. *Enseñanza de las ciencias*. Vol. extra, pp. 209-210.

GIL, D.;(1994), Diez años de investigación en didáctica de las ciencias: realizaciones y perspectivas. *Enseñanzas de las ciencias*. vol. 12 N 2. pp 154-164.

GLICK, Th.F (1986). *Einstein y los españoles*. Alianza: Madrid.

GOLDSTEIN, H., 1970, *Mecánica clásica*, Aguilar: Madrid.

HANNIBAL, L.,(1991), On the concept of energy in classical relativistic physics, *European Journal of Physics*, 12, pp. 283-285.

HEWSON, P.W. (1981). A conceptual change approach to learning Science, *European Journal of Science Education*. 3, pp 383-396.

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, pp 61-78.

HIERREZUELO, J. y MONTERO, A., 1989, *La ciencia de los alumnos: su utilización en la didáctica de la Física y Química*, Laia-M.E.C.:Barcelona, Madrid.

HIERREZUELO, J., (1993) : Ciencias de la Naturaleza: Física y Química, Educación Secundaria 3º y 4º, comentarios. Elzevir: Vélez-Málaga.

HOLTON, G., (1982), *Ensayos sobre el pensamiento científico en la época de Einstein*, (*Einstien, Michelson y el experimento crucial*. Pp 204-294). Alianza: Madrid.

HOLTON, G., 1979, *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*, Reverté: Barcelona.

IRESON, G., Introducing relativistic mass : the "ultimate speed experiment" of William Bertazzi revisited, *Physics Education*, 33(3), 182-186.

IRESON, G.,(1996). Relativity at A-Level: a looking glass approach, *Physics Education*, 31(6), 356-361.

JACKSON, J.D., 1980, *Electrodinámica clásica*, Alhambra : Madrid.

KUHN, T.S., 1975, *La estructura de las revoluciones científicas*, Fondo de cultura económica: México.

KUHN, T.S., 1978, *La revolución copernicana*. Orbis: Barcelona.

LAHERA, J., (1995), *Introducción a la física moderna en la enseñanza secundaria*. Síntesis: Madrid.

LANDAU, L.D. y LIFSHITZ, E.M., 1973, *Teoría clásica de los campos*, Reverté: Barcelona.

LEEMANN, C. (1998). Newton's law of inertia and time. *Physics Education*. 35(1) January pp. 31-37.

LEVICH, B.G. (1974) *Curso de Física Teórica: Teoría del Campo electromagnético y teoría de la relatividad*. Reverté, Barcelona.

MARTÍNEZ TORREGROSA, J., 1987, *La resolución de los problemas de Física como investigación: un instrumento de cambio metodológico*. Tesis doctoral. Universitat de València.

MATTHEWS, M. (1994) *Historia, filosofía y enseñanza de las ciencias: La aproximación actual*. *Enseñanza de las ciencias*. Vol. 12, N. 2, pp. 255-277.

MAXWELL, J.C., 1877, *Matter and motion*, reedición de 1991, Dover: Nueva York.

MCDERMOTT, L.C., 1984, *Research on conceptual understanding in mechanics*, *Physics Today*, 7, 24-34.

NEWTON, I, (1972), *Selección*. Austral: Espasa Calpe: Madrid

NOVAK, D.J., 1982, *Teoría y práctica de la educación*, Alianza Universidad: Madrid.

OKUN, L.B. (1989). The concept of mass. *Physics Today*, Vol. 42, pp. 31-36.

OKUN, L.B., (1998), Note on the meaning and terminology of Special Relativity, *European Journal of Physics* 15 403-406.

OSTERMANN, F. y MOREIRA M.A., (2000) *Física contemporánea en la escuela secundaria: Una experiencia en el aula involucrando formación de profesores*. *Enseñanza de las Ciencias*. Vol, 18, N.3, pp. 391-400.

OTERO, J., 1985, Assimilation problems in traditional representation of scientific knowledge, *European Journal of Science Education*, 7(4), 361-369.

PAIS, A., 1984, *'El Señor es sutil...'*, Ariel: Barcelona.

PALEKAR, A.D. (1993). Spacetime Diagrams in Special Relativity. *Physics Education*. July-September, pp. 171-175.

- PARASNIS, A.S. (1998). Motion, Matter, Mass, Laws of Motion, Newton and Einstein. *Physics Education*. July-September, pp. 109-116.
- PAYÁ, J., 1991, *Los trabajos prácticos en la enseñanza de la Física y la Química: un análisis crítico y una propuesta fundamentada*. Tesis doctoral. Universitat de València.
- PIAGET, J., 1971: "*Psicología y epistemología*". (Ariel: Barcelona).
- POSNER, G.J., STRIKE, K.A., HEWSON, P.W. y GERTZOG, W.A., 1982, Accomodation of a scientific conception: towards a theory of conceptual change, *Science Education*, 66, 211-227.
- RESNICK, R., HALLIDAY, D. y KRANE, K.S., 1992, *Física*, Vol. I y II, CECSA: México
- ROMERO, C. (1996), Una investigación sobre los esquemas conceptuales del continuo. *Enseñanzas de las Ciencias*. Vol. 14 N 1. pp 1-14.
- RUBIO, F.J.; GUERRA, M. y JIMÉNEZ, D.A.; (1994), Movimiento de un objeto esférico en el marco de la teoría especial de la relatividad. *Revista española de física*. Vol 8 (2), pp 47-52.
- RUSSELL, B., (1983). El conocimiento humano. Orbis: Barcelona.
- SALTIEL, E. y VIENNOT, L., 1985, ¿Qué aprendemos de las semejanzas entre las ideas históricas y el razonamiento espontáneo de los estudiantes?, *Enseñanza de las Ciencias*, 3, 137-144.
- SALTIEL, E. y MALGRANE, J.L., (1980) Spontaneous ways of reasoning in elementary kinematics. *European Journal of Physics*, Vol2, pp 73-80.
- SÁNCHEZ, J.L. (2000), El concepto relativista de masa inerte en los textos de física del nuevo bachillerato. *Revista Española de Física*, 14(4).
- SÁNCHEZ RON, J.M. (1985) *El origen y el desarrollo de la relatividad*. Madrid, Alianza. pp 63.
- SÁNCHEZ RON, J.M. (1988) Usos y abusos de la historia de la Física en la enseñanza. *Enseñanza de las Ciencias*. Vol, 6, N.2, pp. 179-188.
- SANDIN, T.R., 1991, In defense of relativistic mass, *American Journal of Physics*, 59 (11), 1032-1036.
- SAWICKI, M., 1996, What's Wrong in the Nine Most Popular Texts, *The Physics Teacher*, 34, 147-149.
- SELLERI, F., (1997), El principio de relatividad y la naturaleza del tiempo. *Revista Española de Física* Vol 11. N3. pp. 37- 42.
- SOLBES, J. (1980). La introducción de los conceptos básicos de Física Moderna. *Tesis doctoral*. Universitat de València.

- SOLBES, J. VILCHES, A., CALATAYUD, M.L., HERNÁNDEZ, J., 1995, *Física y Química, 1º Bachillerato*, Octaedro: Barcelona.
- SOLBES, J. y TARÍN, F., 1998, Algunas dificultades en torno a la conservación de la energía, *Enseñanza de las Ciencias*, 16 (3), 387-397.
- SOLBES, J. y TRAVER, M.J., 1996, La utilización de la historia de las ciencias en la enseñanza de la física y la química, *Enseñanza de las Ciencias*, 14 (1), 103-112.
- SOLBES, J. y VILCHES, A., 1989, Interacciones ciencia/técnica/sociedad (CTS): un instrumento de cambio actitudinal, *Enseñanza de las Ciencias*, 7 (1), 14-20.
- SOLBES, J. y VILCHES, A., 1992, El modelo constructivista y las relaciones ciencia/técnica/sociedad, *Enseñanza de las Ciencias*, 10, 181-187.
- SOLBES, J., 1986, *La introducción de los conceptos básicos de física moderna*. Tesis doctoral. Universitat de València.
- SOLOMON, J., (1983), Learning about energy: how pupils think in two domains, *European Journal of Science Education*, 5 (1), 49-59.
- TARÍN F, 2000, *El principio de conservación de la energía y sus implicaciones didácticas*, Tesis doctoral, Universitat de València.
- TIPLER, P.A., 1985, *Física moderna*, Reverté: Barcelona.
- TIPLER, P.A., 1995, *Física*, Reverté: Barcelona.
- TOLEDO, B. y ARRIASSECO. I. y SANTOS, G. (1997). Análisis de la transición de la Física clásica a la relativista desde la perspectiva del cambio conceptua. *Enseñanza de las Ciencias*. Vol, 15, N.1, pp. 79-80.
- TOULMIN, R., 1972 *Human Understanding, I. The Collective Use and Evolution of Concept*. (Princeton Univ. Press). (Alianza 1977: Madrid).
- TRUEDELL, C., (1975) *Ensayos de Historia de la Mecánica*. Tecnos: Madrid.
- VIENNOT, L., 1976, *Le Raisonnement Spontané en Dynamique Élémentaire*. Tesis doctoral. Herman: París.
- VIENNOT, L., 1979, Spontaneous reasoning in elementary dynamics, *European Journal of Science Education*, 1 (2), 205-221.
- VILLANI, A. y PACCA, J.L.A.. (1987). Students spontaneous ideas about the speed of light. *International Journal of science Education*. ),1, pp. 55-66.
- VILLANI, A. y ARRUDA,S. (1998). Special Theory of relativity, conceptual change and history of science. *Science & Education*. 7, 1, pp. 85-100.

WARREN, J.W.(1976). The mystery of mass-energy. *Physics Education*. Vol. 11, pp. 52-54.

WHELCH,W.(1985). Research in science education:Review and recomendations, *Science Education*. 69, pp 421-448.

WHITAKER, M A B (1976). Definitions of mass in special relativity. *Physics Education*. Vol. 11, pp. 55-57.

WHITTAKER, E., 1989, *A history of the theories of aether & electricity*, Dover: Nueva York.

WILLIAMS P.(1968), selección. *La teoría de la relatividad*. Madrid, Alianza.

YAGER, R.E. y PENICH, J.E., 1986, Perception of four age groups toward science classes, teachers and the values of science, *Science Education*, 70, 355-363.

YNDURAIN, F. (1998) Espacio,tiempo, Materia. *Revista española de Física*. Vol 12. N 2 pp 14-19.



## 8 ÍNDICE DE AUTORES

- ADLER, C.G., 10, 13, 14, 43, 44
- ALEMAÑ, R.A., 23, 24
- ALONSO, M., 11, 13, 29
- ANGOTTI, J.A., 9
- ARONS, A.B., 9, 25
- ARRUDA, S., 9, 27
- AUSUBEL, D. P., 19
- BAUMAN, R.P., 11, 12
- BERKSON, W., 36, 40, 97
- BICKERSTAFF, R.P., 13
- BORGHI, L., 9
- BRISCOE, C., 22
- BUNGE, M., 35
- CAMPANARIO, J.M., 15
- CANDEL, A., 13
- CARRASCOSA, J., 2, 18, 19, 21
- CARSON, S., 10
- CATALÁN, A., 22
- COLOMBO DE CUDMANI, L., 24, 31
- CROMBIE, A.C., 32
- DRIVER, R., 18, 20, 21, 30, 32
- DUIT, 30
- EINSTEIN, A., 6, 10, 34, 36, 39, 40, 42, 43, 44, 49, 55, 56, 57, 59, 71
- EULER L., 35, 37
- FADNER, W.L., 43
- FEYNMAN, R.P., 11, 13
- FINN, E. J., 11, 13, 29
- FRENCH, A.P., 14, 67
- FURIÓ, C., 18
- GALILI, I., 26
- GALLEGOS, J.A., 26
- GARCÍA, J.A., 13
- GERTZOG, W.A., 20
- GETTYS, W.E., 11, 108
- GIANCOLI, D.C., 13
- GIL, D., 1, 2, 8, 9, 10, 15, 18, 19, 20, 21, 22, 24, 29, 30
- GOLDSTEIN, H., 11, 14
- GUESNE, E., 18
- HALLIDAY, D., 27
- HANNIBAL, L., 14
- HEWSON, P.W., 10, 20, 23, 26, 27, 64, 103
- HIERREZUELO, J., 18, 26, 77, 78
- HOLTON, G., 36, 40, 41, 55, 97
- JACKSON, J.D., 11
- KAPLAN, D., 26

KELLER, F.J., 108  
KUHN, T.S., 20, 34, 56  
LAHERA, J., 58  
LANDAU, L.D., 11  
LEEMANN, C., 75  
LEVICH, B.G., 61  
LIFSHITZ, E.M., 11  
MAXWELL, J.C., 38, 41, 42  
MONTERO, A., 18  
MOREIRA M.A., 7, 9  
NEWTON, I, 36, 37, 39, 48, 52, 74, 75, 78  
OKUN, L.B., 10, 14, 43, 44  
OTERO, J., 19  
PACCA, J.L.A., 10, 24  
PARASNIS, A.S., 27, 28  
PATSAKOS, G., 12  
PAYÁ, J., 19, 21  
PEÑA, A., 13  
PIAGET, J., 20, 21  
POSNER, G.J., 20  
RESNICK, R., 27  
ROMERO, C., 26  
RUBIO, F.J., 62  
RUSSELL, B., 1, 33  
SALTIEL, E., 27, 32  
SÁNCHEZ, J.L., 6, 11, 15, 42, 55, 56  
SÁNCHEZ RON, J.M., 6, 11, 15, 42, 55, 56  
SANDIN, T.R., 11, 12, 13, 28  
SAWICKI, M., 11  
SELLERI, F., 39  
SEMENT, F., 8  
SKOVE, M.J., 108  
SOLBES, J., 1, 8, 9, 10, 19, 22, 24, 29, 30  
SOLOMON, 30  
STRIKE, K.A., 20  
TARÍN, F., 1, 29  
TIBERGHIE, A., 18  
TIPLER, P.A., 13, 108  
TOLEDO, B., 24  
TOULMIN, R., 20, 23  
TRUESDELL, C., 37  
VALDÉS, P., 21, 22  
VIENNOT, L., 18, 31, 32  
VILCHES, A., 19, 22  
VILLANI, A., 9, 10, 24, 25, 26, 27, 64  
WARREN, J.W., 12, 29  
WARRINGTON, 30  
WHITAKER, M A B, 14, 55  
WILLIAMS P., 6, 25, 61  
YAGER, R.E., 22  
YNDURAIN, F., 42



