

Resultados de la investigación en educación en física como lentes para analizar libros de texto, reconocer detalles críticos y promover el pensamiento. El caso especial de la enseñanza y el aprendizaje de la relatividad especial.

REVISTA
DE
ENSEÑANZA
DE LA
FÍSICA

Olivia Levrini¹

¹ Department of Physics and Astronomy
Alma Mater Studiorum, University of Bologna, Italy

E-mail: Olivia.levrini2unibo.it

(Recibido el 10 de noviembre de 2014; aceptado el 2 de diciembre de 2014)

Resumen

La enseñanza de la relatividad especial, tanto a nivel de escuela secundaria como de universidad, se encuentra aún fuertemente influenciada por el abordaje diseñado por Resnick en 1968. Este abordaje sigue, de alguna manera, la publicación original de Einstein de 1905 sobre “La Electrodinámica de los Cuerpos en Movimiento” y orienta, de manera más o menos explícita, a los autores de libros de texto.

En el presente trabajo analizo cómo la tradición educativa ha progresivamente transformado la presentación de la teoría, desde el artículo original hasta los textos actuales. En particular, mostraré cómo tal transformación ha progresivamente dejado de lado tanto *detalles críticos* necesarios para la comprensión, así como la *dimensión interpretativa* necesaria para que el abordaje sea comparable a otros y posibilitar así la percepción del significado cultural de la teoría.

El análisis se lleva a cabo utilizando como lentes algunos resultados de la investigación en educación en Física (PER¹), y pretende proveer a los docentes claves para leer “entre líneas” en los textos y reconocer algunas elecciones interpretativas en ellos implícitas.

Palabras clave: Relatividad especial, Libros de texto, Artículos originales, Enseñanza y Aprendizaje

Abstract

The teaching of special relativity, both at the secondary school level and at the university level, is still strongly influenced by the approach designed by Resnick in 1968. This approach follows in some way the 1905 original paper of Einstein on “The electrodynamics of moving bodies” and it is still orienting, more or less explicitly, textbooks’ authors.

In this paper I analyze how the educational tradition progressively transformed the presentation of the theory, from the original article to the current textbooks. In particular, I will show how such a transformation has progressively disregarded both *critical details* needed for understanding, and that *interpretative dimension* needed for making the approach comparable to other possible ones and, hence, needed for perceiving the cultural meaning of the theory.

The analysis is carried out using results in Physics Education Research (PER) as lenses and it is intended to provide teachers with tips for reading in the lines of textbooks and for recognizing some implicit interpretative choices.

Keywords: Special Relativity, Textbooks, Original papers, Teaching and Learning

I. INTRODUCCIÓN

¹ PER, por las siglas en inglés de “Physics Education Research”

La enseñanza de la relatividad especial, tanto a nivel de escuela secundaria como de universidad, se encuentra aún fuertemente influenciada por el abordaje diseñado por Resnick en 1968 (Resnick, 1968). En particular, el abordaje de Resnick puede reconocerse en la base de una difundida traducción educativa que presenta a la relatividad según el siguiente hilo conductor: revisión histórica del estado del conocimiento físico hacia el fin del Siglo XIX y discusión de evidencias experimentales que requerían un revisión de la Mecánica Newtoniana; presentación de los postulados y de los efectos relativistas (derivados ya sea de las transformaciones de Lorentz o de experimentos pensados); explicación de pruebas experimentales y de aplicaciones tecnológicas y, hacia el final, presentación de las nociones principales de la dinámica relativista.

El abordaje de Resnick, en su primera formulación, es reconocible como una transposición didáctica del trabajo original de Einstein de 1905 “sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento”, donde tanto el abordaje operativo como los pilares principales del argumento de Einstein son cuidadosamente respetados y explotados. A diferencia del trabajo original de Einstein, el texto de Resnick presta fuerte atención al experimento de Michelson & Morley (el cual no se menciona explícitamente en el trabajo original, mientras que usualmente es discutido exhaustivamente en los textos²) y, desde luego, se incluyen pruebas experimentales y aplicaciones tecnológicas que se refieren a experimentos realizados como consecuencia de la teoría.

A lo largo de los años, la distancia entre los textos y el trabajo original se ha hecho más y más evidente, sobre todo en el plano retórico. La “voz” de Einstein, de alguna manera fue desapareciendo y un progresivo proceso de “des-personalización” tuvo lugar, a través del cual el lenguaje científico y los argumentos fueron desapareciendo. En los textos actuales, ha desaparecido la tensión argumentativa de quien, mediante un trabajo científico, tiene que persuadir a la comunidad científica de la plausibilidad y relevancia de una nueva teoría; el lenguaje se ha tornado factual, una transmisión lineal y limpia de contenidos compartidos.

En este trabajo, me enfocaré en este caso especial de “des-personalización” y discutiré algunos riesgos que puede involucrar, tanto para *entender* los contenidos básicos de la relatividad, como para *apropiarse* del sentido cultural de la teoría.

En particular, después de una breve ilustración del proceso de despersonalización en el caso de la enseñanza de la relatividad especial a través de un enfoque *à la Resnick* (sección II), recorreré la primera parte del trabajo de Einstein y mostraré cómo su transformación para la enseñanza de manera progresiva ha desatendido tanto *detalles críticos* (Viennot, Chauvet, Colin & Rebmann, 2005) necesarios para entenderla (sección III), como aquella *dimensión interpretativa* necesaria para tornar al enfoque comparable (*commensurable*) con otros y, por lo tanto, necesaria para percibir el significado cultural de la teoría (De Ambrosis & Levrini, 2010; Levrini, Fantini, Pecori, Tasquier & Levin, 2014) (sección IV).

El análisis se llevará a cabo utilizando las lentes de la Investigación en Educación en Física (PER) y pretende proveer a los docentes con claves para leer entre líneas en los textos y para reconocer algunas elecciones interpretativas implícitas. En las conclusiones, se discuten implicaciones para la enseñanza (sección V).

II. DE LOS TRABAJOS ORIGINALES AL TEXTO: ¿OBJETIVACIÓN O EMPOBRECIMIENTO?

La transición desde el artículo original a los textos es algo extremadamente interesante desde un punto de vista cultural; es, de hecho, un paso en el cual se toman decisiones cruciales vinculadas a la imagen de Física que uno desea transmitir. El mismo Kuhn, quien tan significativamente ha contribuido a cambiar la imagen de la Física, abre “La Estructura de las Revoluciones Científicas” con la crítica a la identificación de la ciencia con los libros de texto de ciencia:

La Historia, si fuese vista como algo más que un repositorio de anécdotas o cronologías, podría producir una transformación decisiva en la imagen de ciencia en la que actualmente estamos

² El papel del experimento de Michelson & Morley en la génesis de la relatividad especial, y en particular en el proceso personal de invención de Einstein, ha sido ampliamente investigado desde los trabajos de Shankland [Shankland, R. S., (1964). Michelson-Morley experiment. *Am. J. Phys.* 32 (1), 16-35; Shankland, R. S. (1973). Michelson's role in the development of relativity. *Applied Optics*, 12 (10), 2280; Shankland R. S. (1973). Conversations with Einstein. *Am. J. Phys.* 41 (7), 895-901]. Otros estudios muy autorizados que discuten esta relación tan especial son: Holton, G. (1969). Einstein, Michelson, and the 'Crucial' Experiment. *Isis* 60, 133-97; Pais, A. (1982). “*Subtle is the Lord—*”: *The science and the life of Albert Einstein*, Oxford University Press.

inmersos. Esa imagen ha sido previamente extraída, aún por los mismos científicos, principalmente del estudio de los logros científicos acabados tal como éstos son registrados en obras clásicas y, más recientemente, en los libros de textos con los cuales cada nueva generación de científicos aprende su oficio. De manera inevitable, aunque el propósito de tales libros es persuasivo y pedagógico, es tan poco probable que un concepto de la ciencia extraído de ellos se ajuste al propósito que lo produjo como que la imagen de una cultura nacional extraída de un folleto turístico o de un texto de lengua. (Kuhn, 1962)

En un trabajo de 1996, Clive Sutton argumenta que los libros de texto son al última fase de un proceso que apunta a transformar el lenguaje desde un “sistema interpretativo para dar sentido a nuevas experiencias” a un “sistema de clasificación para describir, reportar e informar (Sutton, 1996). Los pasos de este proceso de conversión se identifican en la secuencia de distintos tipos de publicación: Revista Científica Periódica → Manual de Investigación → Libro de texto, durante el cual

[...] algunas ideas y afirmaciones de individuos particulares se incorporan a la estructura de pensamiento de una comunidad mayor y se convierten en conocimiento público consensuado que les confiere el estatus de ‘hecho’, o ‘hecho por el momento’, o al menos ‘la mejor teoría disponible, que para todos los propósitos podemos suponer correcta’. (Sutton, 1996)

El lenguaje, al pasar de los trabajos originales a los libros de textos, se torna objetivo, definitivo, preciso, necesita la palabra justa para la idea justa; la voz del científico se pierde y las ideas se convierten en “rótulos”:

Cuanto más a menudo [las ideas] se utilizan, mientras más familiares se vuelven, y menos tentativamente se expresan, las palabras inevitablemente comienzan a funcionar como rótulos para aquello sobre lo que las personas ya se sienten seguras. Una frase como “la órbita del electrón”, que surgió como una mera figura retórica, se transforma en un rótulo para una realidad que para toda intención y propósito se considera que existe. (Sutton, 1996).

En la transición que ocurre entre los trabajos originales y los libros de texto, la retórica cambia profundamente: de dialéctica y confrontativa, típica de conocimiento que se está construyendo, a la retórica más simple de la información. Es a través de esta transición que, según Sutton, tiene lugar el proceso de objetivación característico del conocimiento científico: Una afirmación se convierte en un hecho aceptado por la comunidad; desaparecen los argumentos, seleccionados adecuadamente por ser los más convincentes para respaldar una tesis, y el lenguaje, de conjetural, pasa a ser literal, denotativo.

Así pues, si es cierto que en la transición de los trabajos originales a los manuales el proceso de despersonalización lleva a cabo la función, inherente a la Física, de objetivar cada vez más el conocimiento, es igualmente cierto que diferentes significados pueden atribuirse a este proceso en la enseñanza. Por un lado, este proceso puede formar parte de la enseñanza, de manera de brindar a los estudiantes ejemplos de cómo se construye el conocimiento, de qué aspectos epistemológicos, sociológicos y personales pueden estar involucrados, y de cuán dramático – y fascinante- puede ser el proceso de construcción de conocimiento o, por el otro, el proceso puede apenas sugerirse para mostrar el poder de una ciencia que, cuando es despojada de todo elemento de subjetividad, puede abrir los secretos objetivos de la naturaleza.

De manera más o menos consciente, en la enseñanza se adopta el segundo abordaje. Este posicionamiento puede resultar un espejo de la elección epistemológica de considerar a los resultados más importantes que el proceso y a cualquier forma de subjetivismo como lejana a la misma esencia de la Física. Sin embargo, según Gerald Holton, esta elección es más que eso, e implementa una función “normativa y moralizadora” a la educación en Ciencias: La función de familiarizar a los estudiantes con las normas públicas de la profesión científica, entre las cuales se encuentra la norma de minimizar el involucramiento personal en la tarea científica (Holton, 1973).

En el presente trabajo, este proceso de despersonalización se discutirá fundamentalmente en relación a sus implicaciones cognitivas sobre el aprendizaje y el pensamiento, aunque sin desestimar la relevancia de sus consecuencias sobre la imagen de la ciencia.

En el caso en consideración, el proceso que ocurrió entre el trabajo original de Einstein y los libros de texto actuales *via* el abordaje de Resnick, llevó a desestimar, y luego perder, las siguientes características de las elecciones de Einstein: el cuidado que él se tomó en construir, paso a paso, una red de relojes sincronizados necesarios para definir operativamente el espacio y el tiempo en un marco de referencia, su elección epistemológica de presentar a la teoría como una construcción bella, simple y coherente, capaz de resolver *asimetrías teóricas*, y ofrecer una *manera operacional* de mirar al espacio y al tiempo, libre

de estériles entidades metafísicas, como los contenedores Newtonianos absolutos, o el éter lumínico.

En las secciones subsiguientes, usaré los resultados principales de la PER obtenidos sobre las dificultades de los estudiantes para aprender relatividad para argumentar por qué tal proceso, si no es llevado a cabo con cuidado durante la enseñanza, puede llevar a “peligrosas simplificaciones, es decir, descripciones instruccionales hiper simplificadas y explicaciones que, al lograr que el material se vea fácil, son peligrosamente capaces de distorsionar tanto el proceso de aprendizaje como el contenido” (Levrini & Fantini, 2013). Se considerarán dos tipos de simplificaciones peligrosas: i) el descuido de detalles que mostraron ser críticos para una comprensión global y profunda de la teoría, y ii) el empobrecimiento del argumento al punto de presentar “ideas con un solo sentido”, como sostiene Minsky:

Una idea con un solo sentido puede conducir por un único camino. Así pues, si algo sale mal, simplemente se traba – una idea que se queda allí en tu mente sin ningún poder ir a ningún lugar. Es por eso que cuando alguien aprende algo “de memoria” – es decir, sin conexiones razonables – “decimos que en realidad no entienden”. El secreto del significado que le damos a cualquier cosa radica en cómo lo hemos conectado con todas las otras cosas que sabemos. Es por eso que casi siempre es incorrecto buscar el “verdadero significado” de cualquier cosa. Una cosa con un solo significado no tiene prácticamente ningún significado en absoluto. (Minsky 1986, p. 64)

III. CUANDO LA OBJETIVACIÓN DEL LIBRO DE TEXTO IGNORA DETALLES CRÍTICOS.

El trabajo original de Einstein incluye un apartado titulado “Cinemática”, en la cual una larga discusión sobre la definición de tiempo y espacio introduce a las implicaciones de los postulados, las transformaciones de Lorentz, y a los efectos relativistas. En el proceso de objetivación, la tradición didáctica ha ido restringiendo progresivamente esa discusión como una digresión inútil, y terminaron por desaparecer de los libros de texto.

En particular, y de manera mucho más exhaustiva que en los libros de texto, Einstein se toma el cuidado de proveer a un observador con una herramienta ideal, la red de relojes sincronizados, necesaria para “establecer juicios en los cuales el tiempo está involucrado” (Einstein, 1905).

La construcción de la red ocurre a través de pasajes que involucran: i) la introducción de los conceptos de *evento* y *tiempo de un evento*, ii) la discusión del problema de determinar el *tiempo de un evento distante*, iii) la definición de un *procedimiento para sincronizar relojes* que están distanciados espacialmente.

A continuación reconsideraremos estos pasajes ya que, aun a riesgo de resultar pedante, son esos pasos los que pueden esconder algunos *detalles críticos*, es decir, detalles que, si no son tenidos en cuenta, ponen en peligro la comprensión de conceptos clave y la consecución de un proceso de cambio conceptual, tal como lo sostienen varios trabajos en PER sobre la relatividad (Posner, Strike, Hewson & Gertzog, 1982; Hewson, 1982; Sherr, Shaffer & Vokos, 2001; 2002; Levrini & diSessa, 2008)³

A. La definición operacional de Einstein de tiempo y espacio

Al leer el segundo párrafo con el encabezado “Parte Cinemática”, uno advierte que la primera elección de Einstein es la de llevar los conceptos de espacio y tiempo a sus definiciones operativas – coordenadas que han de ser determinadas mediante el uso de reglas rígidas y relojes. En este contexto se introducen y discuten los conceptos de *evento* y *tiempo de un evento*. El escribe:

Si un punto material se encuentra en reposo relativo con respecto a este sistema de coordenadas, su posición puede ser definida de manera relativa a él utilizando estándares rígidos de medición y los métodos de la geometría Euclídea, y pueden ser así expresados en coordenadas Cartesianas.

³ En otro trabajo reviso una selección de artículos en enseñanza/aprendizaje de la relatividad especial y, allí, enfatizo fuertemente hasta qué punto varios estudios llevados a cabo en PER, aplicando distintas metodologías de investigación según distintas perspectivas teóricas, proveen múltiples argumentos trasversales en dirección a una misma conclusión: guiar a los estudiantes a *mirar en términos de eventos* es crucial para promover una comprensión profunda en relatividad especial (Levrini, 2014).

Si queremos describir el movimiento de un punto material, damos los valores de las coordenadas como función del tiempo. Ahora, debemos considerar cuidadosamente el hecho de que una descripción matemática de este tipo no tiene significado físico alguno a menos que seamos muy claros con respecto a qué entendemos por “tiempo”. Debemos tener en cuenta que todos nuestros juicios en los que el tiempo está involucrado son siempre juicios de eventos simultáneos. Si, por ejemplo, digo que “El tren llega aquí a las 7”, estoy diciendo algo así como: “la coincidencia de la aguja pequeña de mi reloj con el 7 y la llegada del tren son eventos simultáneos”⁴. (Einstein, 1905, p.39. Cursivas en el original).

El movimiento de un objeto se convierte así en un conjunto de eventos espacio-temporales, donde cada evento se define mediante las operaciones de medición necesarias para determinar la *posición* y el *instante de tiempo* en el cual el evento ocurre. La definición operacional involucra tanto el uso de una vara de medición como de un reloj. El *tiempo de un evento* es entonces “lo que mide el reloj ubicado junto al evento”. Pero, como escribe inmediatamente después, esta definición no alcanza para determinar el tiempo de eventos que ocurren en ubicaciones distantes del reloj:

Parecería posible superar todas las dificultades involucradas con la definición de “tiempo” reemplazando “tiempo” por “la posición de la aguja pequeña de mi reloj”. Y de hecho tal definición resulta satisfactoria cuando nos interesa definir el tiempo exclusivamente para el lugar en el cual el reloj se encuentra; pero deja de ser satisfactoria cuando tenemos que conectar en el tiempo series de eventos que ocurren en diferentes lugares, o – lo que viene a ser lo mismo – evaluar los tiempos de eventos que ocurren en lugares alejados del reloj. (Einstein, 1905, p.39)

El *tiempo de un evento*, como se define más arriba, muestra sus limitaciones “cuando tenemos que conectar en el tiempo series de eventos que ocurren en diferentes lugares, o – lo que viene a ser lo mismo – evaluar los tiempos de eventos que ocurren en lugares alejados del reloj”. El problema surge porque hemos asumido que en la naturaleza hay una velocidad insuperable. Por esta razón el tiempo de un evento no coincide con el *tiempo de recepción de la señal*, es decir, el tiempo en el cual un reloj alejado de la ubicación del evento, recibe la señal enviada desde el evento mismo. El reloj recibe la señal con una demora igual a d/c , donde d es la distancia que lo separa del evento, y c es la velocidad de la luz en el vacío.

Para abordar el problema que presenta la existencia de una velocidad insuperable en la naturaleza y, por lo tanto, la necesidad de distinguir entre el *tiempo de un evento* y el *tiempo de recepción de la señal*, Einstein enfatiza:

Podríamos, por supuesto, contentarnos con valores de tiempo determinados por un observador ubicado junto con el reloj en el origen de coordenadas y coordinando las correspondientes posiciones de las agujas con señales de luz, enviadas por todos los eventos a ser medidos temporalmente, y que llegan a él a través del espacio vacío. Pero esta coordinación tiene la desventaja de que no es independiente de la posición del observador con el reloj, como nos indica la experiencia. Llegamos a una determinación mucho más práctica a través de la siguiente línea de razonamiento. (Einstein, 1905)

Mediante este argumento, basado en la necesidad de proveer definiciones – y medidas – idealmente independientes de la posición de un observador, Einstein finalmente llega a construir la red de relojes sincronizados (ver Figura 1). Esta es la herramienta que cada observador ha de utilizar para evaluar, en su propio sistema de referencia, el orden temporal de los eventos (si son o no simultáneos), la distancia espacial entre dos eventos y la longitud de un cuerpo. Para construir la red, se provee una definición de simultaneidad para eventos que ocurren en ubicaciones diferentes (sobre la base de la isotropía de la velocidad de la luz) y se muestra un procedimiento de sincronización⁵.

Gracias a la red, un observador ahora está bien equipado para medir el intervalo temporal entre dos eventos, aún cuando se encuentren distanciados en el espacio, ya que su intervalo temporal puede ser

⁴ Prestar atención aquí al hecho que en este caso específico la simultaneidad se refiere a dos eventos que ocurren *en la misma posición*. En este caso, si son simultáneos en un marco de referencia, son simultáneos en todos los marcos de referencia. La relatividad de la simultaneidad se refiere a pares de eventos que, en *ningún* marco de referencia pueden ocurrir en la misma posición (están relacionados con un intervalo tipo-espacio).

⁵ Una forma operativa de sincronizar dos relojes idénticos distantes es poner en C, un punto a igual distancia de ambos relojes, un transmisor de señales de luz. Los relojes en A y B se sincronizan haciendo que marquen el mismo tiempo al recibir la señal de C.

evaluado comparando lo que marcan dos relojes, ubicados exactamente donde ocurre cada uno de los eventos. Más aún, el observador está equipado para medir la longitud de un cuerpo, aplicando definiciones operacionales precisas. También para las longitudes, Einstein presta suma atención al detalle y distingue entre la definición operacional de la longitud de un cuerpo en reposo con respecto al sistema de referencia desde el que se realiza la medición y la longitud de un cuerpo en movimiento:

Ahora nos preguntamos sobre la longitud de una varilla en movimiento, y nos imaginamos su longitud como algo determinado por las dos siguiente operaciones:

- a) El observador se mueve junto con la varilla de medición dada y con la varilla a medir, y mide la longitud de esta última superponiéndole la varilla de medición, de la misma manera que lo haría si los tres estuvieran en reposo.
- b) Mediante relojes estacionarios ubicados y sincronizados en el sistema estacionario [la red de relojes sincronizados], el observador comprueba en qué puntos del sistema estacionario se encuentran los dos extremos de las varillas a medir en un tiempo determinado. La distancia entre estos dos puntos, medidas con la varilla de medición ya utilizada, que en este caso está en reposo, también es una longitud que puede designar ‘la longitud de la varilla’ (Einstein, 1905, p. 41)

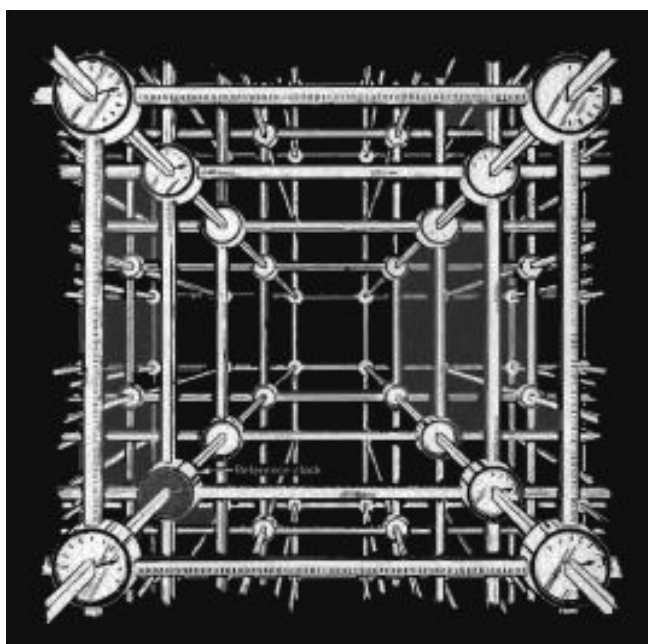


FIGURA 1. Red de relojes sincronizados (Extraída de Taylor & Wheeler, 1992)

Hasta aquí, en el argumento de Einstein, los dos postulados no jugaron un papel específico. El argumento se desarrolla para recomodar la imaginación y adecuarla para pensar en un mundo en el cual se asume una velocidad máxima insuperable. La imaginación se recomoda de manera de poder ver un mundo en el cual los fenómenos se fragmentan en conjuntos de eventos, el espacio y el tiempo son coordenadas que se han de establecer a través de una red de relojes sincronizados y en el cual asumir una velocidad máxima posible lleva a entender un profundo entretejido entre espacio y tiempo – al medir ya sea el tiempo de un evento distante o la longitud de un cuerpo en movimiento, son necesarios tanto reglas como relojes.

Los conceptos de espacio y tiempo sufren su cambio más drástico cuando se introducen los postulados de la teoría y se analizan sus implicaciones. Los postulados introducen nuevas restricciones – normas⁶ – que se han de respetar cuando se analizan fenómenos y leyes físicas desde diferentes marcos inerciales.

Para derivar los efectos relativistas, Einstein, en su trabajo original, sigue el camino de las transformaciones de Lorentz, derivadas de los dos postulados (así como la suposición de homogeneidad e

⁶ En un trabajo anterior, Bertozzi y Levrini (2014), discutimos, desde una perspectiva educacional, el papel normativo de los postulados de la relatividad y sus implicaciones en el cambio del significado de simetría en la física contemporánea.

isotropía del espacio tiempo). Así, los efectos relativistas se obtienen algebraicamente como implicaciones de tales transformaciones. Este camino presenta la desventaja de que los pasos formales pueden eclipsar dos puntos de cierta importancia para entender la teoría: la conexión entre los postulados de la teoría y los efectos relativistas (Posner et al., 1982) y el rol de los procedimientos operativos utilizados para definir tiempo y longitud.

Estos dos puntos pueden, en cambio, ser resaltados si los efectos relativistas se derivan mediante experimentos pensados. Hoy en día, muchos libros de texto⁷ siguen este camino, mediante el cual la relatividad de la simultaneidad se discute sobre la base del así llamado “experimento pensado de la paradoja del tren” y la dilatación del tiempo sobre la base del “experimento del reloj de luz”. Comúnmente, la contracción de las longitudes se deriva de la expresión formal obtenida para la dilatación de los tiempos en el experimento del reloj de luz. En la sección C se discutirán las dificultades de los estudiantes para entender los experimentos pensados y los efectos relativistas. Antes de ellos, quisiera volver a la red de relojes sincronizados y proveer un nuevo argumento para enfatizar en qué sentido constituyó, para Einstein, una herramienta para acomodar la imaginación.

B. El mundo visto desde la oficina de patentes de Berna a comienzos del 1900

En el primer párrafo de su libro “Los Relojes de Einstein, los Mapas de Poincaré”, el historiador Peter Galison escribe:

En el corazón de esta convulsión radical en la concepción [Einsteiniana] del tiempo yace una idea extraordinaria, pese a su simple enunciado, que desde entonces ha ocupado un lugar central en la física, la filosofía y la tecnología: Para hablar del tiempo, de la simultaneidad a distancia, uno tiene que sincronizar sus relojes. Y si uno quiere sincronizar dos relojes tiene que comenzar con uno, enviar una señal al otro y corregir el tiempo que tarda en llegar la señal. ¿Qué podría ser más simple? Pero con esta definición procedimental de tiempo, la última pieza del rompecabezas de la relatividad encajaba en su lugar, cambiando la física para siempre. (Galison, 2003)

El libro intenta reconstruir los mundos materiales en los cuales estaban inmersos Einstein y Poincaré a comienzos del Siglo XX y, en algún sentido, “el libro es sobre aquel procedimiento de coordinación de relojes”. La cuestión de la coordinación de relojes, afirma Galison, era

al mismo tiempo una elevada abstracción y una concreción industrial. Era un mundo en el que los máximos alcances de la física teórica tenían soporte en una fuerte ambición moderna por tender cables que llevaban la hora a la totalidad del planeta para coreografiar trenes y completar mapas. Era un mundo donde ingenieros, filósofos y físicos trabajaban hombro a hombro; donde el alcalde de Nueva York daba discursos sobre la convencionalidad del tiempo, donde el Emperador de Brasil esperaba al borde del océano la llegada telegráfica de la hora europea; y donde dos de los mayores científicos del siglo, Albert Einstein y Henri Poincaré, situaban la simultaneidad en las encrucijadas de la física, la filosofía y la tecnología. (Galison, 2003)

⁷ Ver, por ejemplo, el texto de Halliday, Resnick, Walker, o Giancoli (2004).

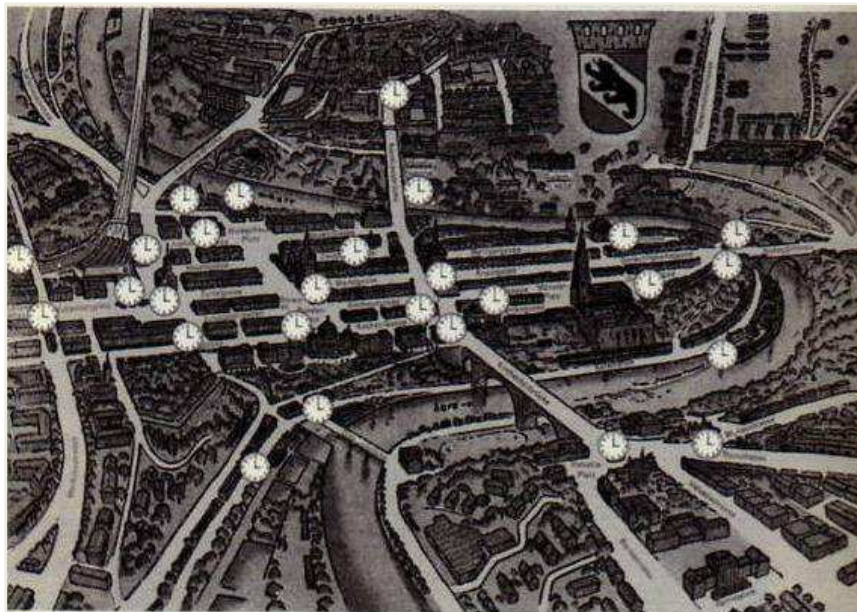


FIGURA 2. La red de relojes eléctricos de Berna (en 1905). Imagen del libro de P. Galison (2003).

Del trabajo de Galison, aprendemos que en aquel tiempo, Berna era una ciudad moderna, orgullosa de su red de relojes electro coordinados (ver Figura 2) y también que, en esos tiempos el número de patentes para la electro-coordinación de relojes distantes aumentó a lo largo de los primeros años del Siglo XX y, muy probablemente, patentes como la mostrada en la Figura 3 pasaran por la oficina en la que Einstein trabajaba.

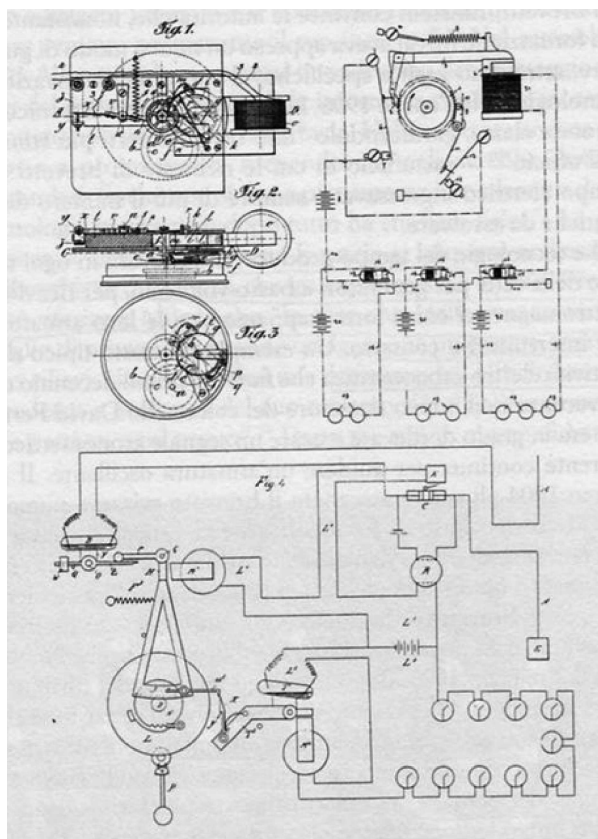


FIGURA 3. Patentes para electro-coordinar relojes distantes. Ilustración del libro de P. Galison (2003).

En este sentido, el mundo en el cual Poincaré escribió “la medida del tiempo” (1898) y Einstein

escribió “La Electrodinámica de los cuerpos en movimiento” (1905) era un lugar alejado del tiempo absoluto, teológico, de Newton. El tiempo era un procedimiento, y su medida a escala global, tan íntimamente relacionada a la cuestión de la longitud, era una cuestión diplomática de convenciones. (Galison, 2003).

Fue en este entorno cultural que Einstein, con sus amigos de la Olimpia Academy, leyó los artículos de Poincaré e incluyó, en su propio artículo, la larga discusión acerca de la construcción de la red “ideal” de relojes sincronizados. Einstein estaba fascinado por el mundo material y sus escritos están plagados de objetos (trenes, imanes, brújulas, relojes, varillas...). Pero, por sobre todas las cosas se sentía fascinado por la capacidad de asombrarse frente a ciertos objetos:

Me encontré de esa manera maravillado siendo un niño de 4 o 5 años cuando mi padre me mostró una brújula. Que aquella aguja se comportara de una manera tan determinada no encajaba de ninguna manera en la forma de los incidentes que tenían cabida en el inconsciente vocabulario de los conceptos (acción conectada al “tacto”). Aún recuerdo – o creo recordar – que este incidente causó en mí una profunda impresión. Tenía que haber algo profundamente escondido detrás de las cosas. (Einstein, 1949).

Uno puede suponer que, también frente a las patentes de los relojes sincronizados, Einstein haya pensado que “tenía que haber algo profundamente escondido detrás de las cosas”. Y, en el caso de la relatividad especial, ir más hacia ese ‘detrás’ implicaba buscar conjeturas fundamentales para elevarlas al rango de postulados, desde los cuales el mundo de eventos, coordinados por las relaciones espaciales y temporales definidas por la red, revelara su propia “maravillosa” simplicidad.

Los procesos de guiar a los estudiantes a través de los argumentos de Einstein e invitarlos a jugar ese juego de imaginación tienen, en mi opinión, un profundo valor cultural. Sin embargo, estos procesos son también cruciales para ayudarlos a abordar dificultades bien conocidas para entender los efectos relativistas, como argumentaré en la siguiente sección.

C. Detalles críticos

Vale la pena enfatizar algunos detalles en la construcción de Einstein de la red de relojes sincronizados, ya que éstos son críticos para el aprendizaje. Estos son: 1) el foco de la discusión está puesto sobre el concepto de *evento*; 2) la cuidadosa distinción entre el *tiempo de un evento* y el *tiempo de la recepción de la señal*; 3) la distinción entre un observador, situado necesariamente en una posición del sistema de referencia y la red de relojes que permite a un “observador inteligente” (Sherr et al., 2001) medir las posiciones y el tiempo de eventos en cada punto del marco de referencia, independientemente de la posición del observador.

En el campo de la PER, el papel de los eventos es conocido desde 1982, cuando Peter Hewson publica un artículo en el cual discute en detalle las dificultades de los estudiantes en entender la contracción de las longitudes y demuestra que la longitud es generalmente tratada por los aprendices como una constante, independiente de la elección del marco de referencia. Según esta visión, la contracción de la longitud se concibe simplemente como una distorsión de la percepción. Afirma Hewson que, detrás de esta tendencia, es posible reconocer un compromiso metafísico con una *visión mecanística* del mundo (Hewson, 1982). Al igual que en el mundo Newtoniano, se asume que los objetos extensos tienen propiedades fijas (una longitud fija) y que los fenómenos una duración [temporal] fija. Longitud y duración son concebidas como realidades fundamentales en la naturaleza. Se muestra en el artículo cómo un estudiante, durante una entrevista, realizó un proceso progresivo de cambio conceptual gracias al entrevistador que lo alentó a revisar su compromiso metafísico. El factor disparador del proceso fue la decisión del entrevistador de introducir la posición Einsteiniana de modo de “presentar el punto de vista en el que los *eventos*⁸ eran más fundamentales, y que la longitud, por ejemplo, podía interpretarse en términos de eventos, es decir, algo localizado en el espacio y en el tiempo (Hewson, 1982). Esta elección llevó al estudiante a cambiar su foco de atención. Mientras que seguía creyendo que existe una realidad independiente de la medición, cambió su visión de cómo esa realidad se manifiesta mediante eventos y no mediante propiedades constantes de los objetos como la longitud.

La tendencia a considerar los efectos relativistas como distorsiones de perspectiva ha sido identificada en otros estudios que han revelado la resistencia de los estudiantes a abandonar la idea de tiempo absoluto o simultaneidad absoluta (Scherr et al., 2001). Más específicamente, investigadores de Seattle han observado que los estudiantes a menudo fallan en interpretar adecuadamente el ‘tiempo de un evento’ y la

⁸ Las cursivas aparecen, significativamente, en el texto original. No han sido agregadas.

noción de ‘marco de referencia’: “Encontramos que estudiantes de distintos niveles tienden a tratar al tiempo de un evento como el tiempo en que la señal proveniente del evento es recibida por un observador. De esta manera, consideran a los marcos de referencias como entidades dependientes de la localización.” (Scherr *et al* 2002, p. 1239). Esta tendencia se revela a través de problemas inventados por el grupo de Seattle, como el “problema de los volcanes” en todas sus variantes, que representa una deliciosa situación para ser usada en clase. Una de tales variantes se muestra en la Figura 4.

En este problema, todos los eventos y movimientos ocurren a lo largo de una única línea en el espacio. Pueden despreciarse los efectos no inerciales sobre la superficie de la Tierra.

Dos volcanes, Mte. Rainier y Mte. Hood, se encuentran separados por 300 km en su marco de referencia en reposo. Cada uno erupciona repentinamente con una explosión lumínica. Un sismólogo en reposo en un laboratorio a mitad de camino entre los dos volcanes recibe las señales de luz de los volcanes al mismo tiempo. El asistente del sismólogo se encuentra en reposo en un laboratorio en la base del Mte. Rainier.

Defina al Evento 1 como “Erupción del Mte. Rainier” y al Evento 2 como “Erupción del Mte. Hood”

Una veloz nave espacial vuela sobre el Mte. Rainier en dirección al Mte. Hood con velocidad constante $v=0.8c$ relativa al suelo ($\gamma=5/3$). En el momento en que el Mt. Rainier erupciona, la nave se encuentra exactamente sobre él y así el piloto de la nave recibe la señal de la erupción del Mte. Rainier instantáneamente.

Todos los observadores son observadores inteligentes, i.e., corrigen por la demora en la llegada de la señal para determinar el tiempo de los eventos en su propio marco de referencia. Cada observador tiene relojes sincronizados con todos los otros observadores en sus marcos de referencia.

Para cada uno de los observadores listados abajo, ¿El Evento 1 ocurre antes, después, o al mismo tiempo que el Evento 2? Explique.

- Sismólogo
- Asistente del sismólogo
- Piloto de la nave.

FIGURA 4. Problema de los volcanes en la versión explícita de la pregunta sobre la nave (Scherr et al., 2001)

Además, los estudiantes universitarios que aprenden relatividad tienden a responder que para el asistente y el piloto de la nave, el Evento 1 ocurre antes del Evento 2, dado que se enfocan en “el tiempo en el cual la señal que proviene del evento es recibida por el observador” y no en “el valor de los eventos” y porque confunden observador con marco de referencia. Varios años de experiencia personal con estudiantes de escuela secundaria, estudiantes universitarios, y docentes en formación me ha llevado a observar que, si se guía a los estudiantes a analizar la argumentación de Einstein y a re-organizar su imaginación, fácilmente llegan a reconocer que, en un dado marco de referencia, equipados con una red de relojes sincronizados, la posición de los observadores no juega ningún papel en el tiempo de los eventos, aunque sí tiene influencia sobre el tiempo en que la señal es recibida. Así, ellos llegan a concluir que los dos eventos son simultáneos para los dos observadores en reposo en la Tierra, mientras que el Evento 2 ocurre antes que el evento 1 en el sistema de referencia móvil.

También previo a mis pruebas empíricas, Sherr y colaboradores, sobre la base de sus resultados problemáticos, produjeron un material curricular para estudiantes universitarios que probó ser exitoso, siendo testeado mediante una metodología de investigación que utilizaba pre y post tests con una amplia muestra de estudiantes. La estrategia implementada en su tutorial era, como en mis pruebas, la de enfocarse en el concepto de *evento* y en la argumentación de Einstein. En particular, dos tutoriales fueron diseñados por el equipo de Seattle. El primero de ellos apunta a guiar a los estudiantes

a desarrollar los procedimientos básicos que permiten a un observador medir *el tiempo de un evento distante aislado*. Estos procedimientos forman la base para definir un *sistema de referencia como un sistema de observadores inteligentes*. El tutorial luego ayuda a los estudiantes a extender la noción intuitiva de si *dos eventos locales* son o no simultáneos

haciéndolos desarrollar una definición de simultaneidad para eventos que tienen una separación espacial. (Scherr *et al.* 2002, p. 1239, cursivas agregadas).

El segundo tutorial apunta a guiar a los estudiantes “a examinar las consecuencias de la invariancia de la velocidad de la luz mediante un análisis de la paradoja del tren” (Scherr *et al.* 2002, p. 1239).

De esta manera, los tutoriales fueron diseñados para guiar a los estudiantes hacia el análisis de los experimentos pensados de Einstein, mediante un concepto de marco de referencia estructurado y operativo, como una red de reglas y relojes sincronizados o, como sostienen Scherr y colaboradores, como “un sistema de observadores inteligentes” (Scherr *et al.* 2001; 2002). La construcción de tal sistema de observadores inteligentes implica enfatizar todos los detalles que pueden encontrarse en el trabajo original de Einstein y que fueron ignorados en el proceso de “objetivación”: i) la noción de tiempo de un evento aislado, medido con el reloj situado en la misma posición espacial del evento; ii) el procedimiento de medir el tiempo de un evento aislado distante, respetando la restricción de que existe un límite para la velocidad de las señales; y iii) la necesidad de generalizar el procedimiento de medición del tiempo de un evento para poder imaginar un arreglo de observadores y el equipo que les permita registrar la posición y el tiempo de un evento arbitrario.

En un trabajo anterior (Levrini y diSessa), hemos presentado el análisis de un episodio de clase en el cual estudiantes secundarios revelan dificultades con el concepto de tiempo propio, pero lentamente avanzan en mejorar su comprensión.⁹

El concepto de tiempo propio usualmente se introduce, en la enseñanza, a través del experimento pensado del reloj de luz. Sin embargo, el análisis y discusión de este experimento pensado usualmente no se enfoca en las propiedades *específicas* de *aquellos pares de eventos* cuyo intervalo espaciotemporal es llamado tiempo propio (por ejemplo, definiendo el tiempo propio como el intervalo temporal medido entre *dos eventos que ocurren en la misma posición espacial*). El experimento del reloj de luz, en cambio, se usa para definir el tiempo propio como la *duración temporal de un fenómeno* (el viaje de ida y vuelta de un rayo de luz) medida en el marco de referencia *en reposo con respecto* al reloj de luz. Los trabajos de Hewson mencionados más arriba llevan a prever que los estudiantes, en todo otro contexto donde deben determinar el tiempo propio, no buscan un par de eventos cuya coincidencia espacial determine el marco relevante, sino que buscan un objeto (como el reloj de luz), o, de manera levemente más compleja, la “localización de un fenómeno” cuya duración ha de medirse. Esto implica que la enseñanza podría estar reforzando la persistencia de “inferencias ontológicas clásicas” que dan por sentado la existencia de los fenómenos como entidades no problemáticas que tienen un lugar y una duración. Esto es lo que ocurrió en el episodio de clase descrito en el trabajo mencionado. Allí se muestra, mediante la Teoría de Clases de Coordinación, que los estudiantes tienden a mantener una ontología clásica que los llevaba a *coordinar* la propiedad de invariancia como una propiedad interna e intrínseca del fenómeno. Al igual que en los otros ejemplos discutidos más arriba, lo que hizo cambiar la perspectiva de los estudiantes fue una clase en la cual el docente progresivamente llevó a los estudiantes a modificar su atención y pasar de “mirar en términos de fenómenos” a “mirar en términos de eventos”.

IV. CUANDO LA “OBJETIVACIÓN DE LOS LIBROS DE TEXTO” CANCELA LA DIMENSIÓN INTERPRETATIVA.

En el libro “Fundamentos de Física”, de Halliday, Resnick y Walker, el capítulo sobre relatividad comienza de la siguiente manera¹⁰:

La Relatividad es el campo de estudio que mide eventos (cosas que ocurren): dónde y cuándo ocurren, y cuánto están separados dos eventos en el espacio y en el tiempo. Además, la relatividad tiene que ver con transformar tales medidas (y también las medidas de la energía y el momento) entre marcos de referencia que se mueven de manera relativa uno respecto al otro

⁹ El concepto de tiempo propio, como el de masa propia y longitud propia, es particularmente engañoso ya que su comprensión es fuertemente dependiente del nivel de apropiación del cambio entre el espacio+tiempo Newtoniano y el espaciotiempo relativista. Su propiedad de invariancia es en realidad una expresión de la invariancia del intervalo espaciotemporal entre dos eventos. Además, la invariancia de la masa está estrictamente relacionada con la estructura del espaciotiempo relativista, siendo el módulo del cuadrivector energía-momento. Este punto es abordado muy efectivamente por Taylor & Wheeler (1992) y sería bueno entender por qué muchos textos y docentes aún utilizan la noción de masa relativista (una que depende de la velocidad), a pesar de las agudas críticas presentes en la literatura (e.g. Adler, 1987; Warren, 1976; Whitaker, 1976).

¹⁰ En Italia, hay una versión de este libro para escuelas secundarias. El capítulo de relatividad especial comienza con la frase aquí reportada.

(de allí el nombre Relatividad) (Halliday, Resnick, Walker, 1997).

Este párrafo condensa la interpretación operacionista de la relatividad especial la cual es, sin embargo, raramente discutida.

El operacionalismo obtuvo su status epistemológico en los '20, siguiendo los trabajos de Bridgman. En referencia a los trabajos tempranos de Einstein, Bridgman propuso caracterizar a la ciencia, con respecto a la no-ciencia, sobre la base del tipo de definición que puede darse al "concepto físico" como un "grupo de operaciones necesarias para medir": "con cualquier concepto nos referimos nada más que a un conjunto de operaciones; la identificación del concepto sinónima al correspondiente conjunto de operaciones". (Bridgman, 1927)

El operacionalismo se volvió una importante perspectiva para enseñar relatividad fundamentalmente por el trabajo de Resnick y su libro "Introducción a la Relatividad Especial", con el cual, como se ha mencionado varias veces, se formaron varias generaciones de estudiantes. En el texto, el significado intrínseco de la relatividad se expresa mediante esta aguda frase: "*La Relatividad Especial es una teoría de la medición y el movimiento afecta la medición.*" (Resnick, 1969)

El éxito de la propuesta de Resnick probablemente se deba también a la elección de un abordaje operacionista que, aunque criticado por muchos físicos y filósofos como una forma simplista de empirismo, tiene un gran poder de persuasión por la imagen de concreción que parece dar.

Las críticas fundamentales abordadas por los físicos al abordaje de Resnick involucran las limitaciones del lenguaje operativo-algebraico al pasar a la relatividad general y resaltar la estructura formal quadri-dimensional según la cual deben redefinirse las nuevas relaciones entre los conceptos dinámicos de masa, energía y momento. Más aún, según algunos físicos, creer que los únicos conceptos identificados como *físicos* eran aquellos relacionados a sus definiciones operacionales era muy limitante. En particular, la emergencia de la mecánica cuántica y la aceptación de conceptos tales como función de onda, puso en serios aprietos a los criterios utilizados por Bridgman. El mismo Einstein, en la formulación de la relatividad general, no pudo más manejarse con un abordaje operacionista, lo que le valió que el mismo Bridgman lo "acusara" de traición (Bridgman, 1949).

Como se anticipara, actualmente en los textos para la escuela secundaria la perspectiva operacionista sólo se insinúa. De hecho, subsisten rastros en frases como la mostrada al comienzo de esta sección y el lenguaje parece referirse a una presentación epistemológicamente neutra del contenido. Tal vez el proceso de des-personalización fue, en este caso, motivado por la intención de poner a la presentación del contenido a buen resguardo de posibles críticas epistemológicas, pero el resultado fue la desaparición de cualquier dimensión interpretativa y las ideas son "forzadas a seguir un solo camino" (Minsky, 1986).

En cualquier caso, la presencia de aquellas pocas oraciones y las elecciones de resaltar el lenguaje algebraico y los efectos relativistas continúan haciéndose eco de un mundo y de una visión física que no es inmune a la crítica de aquellos que no comparten los presupuestos epistemológicos o que ven las limitaciones físicas del abordaje de Resnick. Por otro lado, explicitar los presupuestos, no necesariamente implica compartirlos. También puede significar, simplemente, entenderlos, acceder a sus implicaciones y, fundamentalmente, abrir la posibilidad para una "verdadera" confrontación con otras posibles interpretaciones, como la "geométrica" que, por más de veinte años, ha despertado curiosidad e interés entre docentes e investigadores en educación en física. Me refiero específicamente a la propuesta de Taylor y Wheeler, cuya primera edición fue publicada en 1965 y se convirtió en la otra referencia fundamental para enseñar relatividad especial tanto en la universidad como en las secundarias del mundo occidental. En Italia, el abordaje de Taylor y Wheeler ha sido adoptado por un grupo de docentes de *élite*, aunque la edición 1992 del libro de Taylor y Wheeler fuera concebida para ser usada por un amplio abanico de estudiantes y docentes. El resultado es que aún es percibido por los docentes como un currículo fuertemente innovador (De Ambrosis & Levrini, 2010).

Los dos currículos son profundamente diferentes, ya que se enfocan en distintos conceptos (efectos relativistas o cantidades y relaciones invariantes), usan distintos lenguajes y reflejan distintas interpretaciones de la relatividad especial. En particular, la propuesta de Taylor y Wheeler ofrece una elegante y conceptualmente transparente reconstrucción no-histórica de la teoría, basándose fuertemente en la reconstrucción geométrica de la relatividad especial. El abordaje geométrico permite que las propiedades de invariancia de la teoría asuman un papel central con respecto a los efectos relativistas y la apertura hacia la relatividad general se ve considerablemente facilitada.

La perspectiva geométrica de Taylor y Wheeler tiene sus raíces en el trabajo de Minkowski y, en particular, en la invención de diagramas de espacio-tiempo que los libros de texto usualmente presentan como una herramienta útil para visualizar los efectos relativistas ya encontrados algebraicamente. Un análisis del trabajo original del Minkowski (Levrini, 2002) permitió en cambio, descubrir las

implicaciones epistemológicas de aquella elección lingüística y comprender que la geometría era elegida para resaltar el carácter absoluto e invariante del espacio-tiempo, asumido como “el mundo”:

El término postulado relativista para el requerimiento de una invariancia con el grupo G_c [Grupo de Lorentz] me resulta muy endeble. Dado que el postulado viene a decir que el sólo el mundo cuadri-dimensional en el espacio y el tiempo está dado por los fenómenos, pero que la proyección en espacio y en tiempo aún puede tomarse con cierto grado de libertad, yo prefiero llamarlo el *postulado del mundo absoluto* (o, brevemente, el postulado del mundo). (Minkowski, 1909)

Un análisis comparativo de los trabajos originales de Einstein y Minkowski, además de resaltar las raíces históricas de la relatividad de las principales tradiciones educativas, permite anclar las dos propuestas de enseñanza al debate histórico sobre los conceptos de espacio y tiempo en física. En particular, el análisis comparativo de los trabajos originales muestra que los postulados de la teoría admiten también una posición espacio temporal "substancialista" absoluta (la idea por la cual el espacio y el tiempo son verdaderos contenedores) en comparación a las posiciones "relacionalistas" de Einstein y Poincaré, según las cuales el espacio y el tiempo no son más que relaciones entre eventos elaborados por los humanos para entender el mundo (Levrini, 1999). Efectivamente, desde el comienzo mismo de la conferencia que Minkowski realizó en Colonia en 1908, con el título "Raum und Zeit" (publicada en 1909), enfatizó que el resultado más significativo de la relatividad especial no era haber removido de la física los dos contenedores absolutos de Newton (el espacial y el temporal). El corazón de la nueva teoría era que los unificaba en un único contenedor espaciotemporal al cual le agrega las propiedades de *realidad* (suposición substancialista) y de independencia de cualquier observador (principio de invariancia).

Las visiones de espacio y tiempo que quiero presentar ante ustedes han surgido de la tierra de la física experimental, y allí yace su fortaleza. Son radicales. Por lo tanto el espacio por sí solo y el tiempo por sí solo, están condenados a desaparecer en meras sombras, y sólo una especie de unión entre los dos preservará una realidad independiente (Minkowski, 1909).

La comparación de los dos abordajes (algebraico y geométrico) a través del análisis de sus raíces históricas, ha sido discutida tanto en clases de secundario como en el contexto de formación de profesores. El objetivo era el de encender, mediante una estrategia de contraste, la dimensión interpretativa y permitir al pensamiento moverse a través de diferentes contextos y perspectivas.

En el caso de estudiantes secundarios, un análisis a nivel de elementos fundamentales, llevado adelante utilizando la teoría de clases de coordinación (diSessa & Sherin, 1998) permitió analizar datos de clases y explicar por qué una perspectiva múltiple, y en particular, aprender desde contextos y definiciones *múltiples*, puede ser una buena técnica instruccional para trabajar dificultades ya documentadas sobre el cambio conceptual en relatividad (Levrini & diSessa, 2008).

En el caso de formación de profesores, nuestro análisis nos permitió argumentar que el proceso de apropiación de los docentes de un abordaje menos familiar, como el de Taylor y Wheeler, requiere que éstos adquieran un criterio para hacer a esa propuesta explícitamente “comparable” con propuestas más familiares para los docentes (la de Resnick) (De Ambrosis & Levrini, 2010).

Para los docentes, la discusión sobre la progresiva pérdida de la dimensión interpretativa en el abordaje de Resnick fue muy álgida y apasionada, y el análisis de las raíces históricas de los dos enfoques muy apreciado. De hecho les permitió poner a ambos enfoques en el mismo terreno y compararlos como diferentes elecciones de reconstrucción de contenido, inspirados por diferentes visiones globales de la teoría y de su enseñanza, superando la tendencia a evaluarlas como las alternativas “ortodoxa/heterodoxa”. Ser conscientes de esto guió a los docentes a revisar críticamente no sólo las propuestas de los libros, sino también sus propias formas de enseñar, removiendo el valor absoluto que a menudo asumen (De Ambrosis & Levrini, 2010).

V. COMENTARIOS FINALES

En este trabajo, recorrí la primera parte del trabajo original de Einstein y lo leí a través de las lentes de la Investigación en Educación en Física (PER). Estas lentes permiten reconocer algunos detalles críticos y restaurar la dimensión interpretativa.

El análisis puede ser interpretado y usado como una propuesta para reconstruir algunos significados presentes en los enfoques de los libros de texto más difundidos; significados que se han perdido a los

largo del tiempo, pero que son necesarios para entender los conceptos básicos de la relatividad y captar las peculiaridades de una posible interpretación del formalismo de una teoría. El análisis también puede ser interpretado como un intento de ahondar en las razones para el abordaje de Resnick (1968), abordaje que, en algún sentido hizo a la historia de la enseñanza de la relatividad y que ahora puede considerarse como el abordaje "tradicional", en comparación con el cual se han de analizar las peculiaridades de otros abordajes innovadores, como el de Taylor y Wheeler.

Las reflexiones que he llevado a cabo tienen sus raíces en la creencia de que enseñar relatividad, como cualquier otra área de la física, cobra un especial valor cultural y efectividad didáctica si permite a los estudiantes comparar múltiples interpretaciones y miradas al mismo contenido. La razón es muy simple e involucra el hecho que, dado que el significado de los conceptos es complejo, una organización de contenidos que de alguna manera respete la complejidad del significado, debe prever redes de significados ricas y bien conectadas, puesto que:

“demasiadas e indiscriminadas conexiones transformarán tu mente en una papilla. Pero estructuras de significado bien conectadas le permiten a uno hacer dar vueltas a las ideas en la cabeza, considerar alternativas y ver las cosas desde diferentes perspectivas hasta que uno encuentra una que funciona. ¡Y eso es lo que queremos decir con pensamiento!” (Minsky 1986, p. 64)

REFERENCIAS

- Adler, C.G. (1987). Does mass really depend on velocity, dad?. *Am. J. Phys.*, 55(8), 739-743.
- Bertozzi, E. & Levrini, O. (2014). Symmetry as conceptual core of the standard model of physics: Actions for science education, *Symmetry: Culture and Science*, 25(3), 279-287.
- Bridgman, P. W. (1927). *The Logic of Modern Physics*. New York: Macmillan.
- Bridgman, P. W. (1949). Einstein's Theories and the Operational Point of View, in P. A. Schilpp, ed., *Albert Einstein: Philosopher-Scientist* (La Salle, Illinois: Open Court), 333-354.
- De Ambrosis, A. & Levrini, O. (2010). How physics teachers approach innovation: An empirical study for reconstructing the appropriation path in the case of special relativity. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, doi: 10.1103/PhysRevSTPER.6.020107.
- diSessa, A. A. & Sherin, B. L. (1998). What changes in conceptual change? *International Journal of Science Education*, 20(10), 1155-1191.
- Einstein, A. (1905). Zur Elektrodynamik bewegter Körper, *Annalen der Physik*, XVII, pp. 891-921 (On the electrodynamics of moving bodies, in Lorentz, H. A., Einstein, A., Minkowski, H., Weyl, H.: 1952, *The principle of relativity. A collection of original memoirs on the special and general theory of relativity*. (with notes by A. Sommerfeld) Dover Publications, New York, pp.37-65).
- Einstein, A. (1949). Autobiographic Writings, in Schilpp, *Albert Einstein as philosopher and scientist*.
- Galison, P. (2003). *Einstein's Clocks, Poincaré's Maps. Empires of Time*. New York: W.W. Norton.
- Giancoli, G. D. (2004). *Physics: Principles with Applications* (6th Edition). Pearson Prentice Hall
- Hewson, P.W. (1982). A case study of conceptual change in special relativity. The influence of prior knowledge in learning. *European Journal of Science Education*, 4(61), 61-78.
- Halliday D., Resnick R., Walker J. (1997). *Fundamentals of Physics*. J. Wiley & Sons, Inc.).
- Holton, G. (1973). *Thematic origins of scientific thought, Kepler to Einstein*, Harvard University press, Cambridge (MA), London (England) (revised version 1988).
- Kuhn, T. S., *The Structure of Scientific Revolutions*, University of Chicago Press, Chicago, 1962

- Levrini, O. (1999). Relatività ristretta e concezioni di spazio, *Giornale di fisica*, XL, 4, 205-220.
- Levrini, O. (2002). The substantialist view of spacetime proposed by Minkowski and its educational implications. *Science & Education*, 11(6), 601-617.
- Levrini, O. (2014). The Role of History and Philosophy in Research on Teaching and Learning of Relativity. In M. R. Matthews (ed.), *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching*, Springer Netherlands, 157-181.
- Levrini, O. & diSessa, A.A. (2008). How students learn from multiple contexts and definitions: Proper time as a coordination class. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, doi: 10.1103/PhysRevSTPER.4.010107.
- Levrini, O., Fantini, P. (2013). Encountering Productive Forms of Complexity in Learning Modern Physics. *Science & Education*, DOI: 10.1007/s11191-013-9587-4
- Levrini, O., Fantini P., Pecori B., Tasquier G., Levin, M. (2014). Defining and Operationalizing 'Appropriation' for Science Learning, *Journal of the Learning Sciences*, DOI: 10.1080/10508406.2014.928215
- Minkowski, H. (1909). Raum und Zeit, *Physikalische Zeitschrift*, 10, No.3, 104-111 (Space and Time, in Lorentz, H. A., Einstein, A., Minkowski, H., Weyl, H.: 1952, *The principle of relativity. A collection of original memoirs on the special and general theory of relativity*. (with notes by A. Sommerfeld) Dover Publications, New York, pp.73-96).
- Minsky, M. L. (1986). *The Society of Mind*. New York: Simon and Schuster.
- Poincaré, H. (1898). La mesure du temps, *Revue de métaphysique et de morale* 6: 1-13.
- Posner, G. J., Strike, K.A., Hewson, P.W. & Gerzog, W.A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2), 211-227.
- Resnick, R. (1968). *Introduction to Special Relativity*, John Wiley & Sons, Inc., New York, London.
- Scherr, R. E., Shaffer, P. S. & Vokos, S. (2001). Student understanding of time in special relativity: Simultaneity and references frames. *American Journal of Physics*, 69(7), S24 S35.
- Scherr, R. E., Shaffer, P. S. & Vokos, S. (2002). The challenge of changing deeply held student beliefs about relativity of simultaneity. *American Journal of Physics*, 70(12), 1238 1248.
- Shankland, R. S., (1964). Michelson-Morley experiment. *Am. J. Phys.* 32(1), 16-35;
- Shankland, R. S. (1973). Michelson's role in the development of relativity. *Applied Optics*, 12(10), 2280;
- Shankland R. S. (1973). Conversations with Einstein. *Am. J. Physics* 41(7), 895-901
- Sutton C., Beliefs about science and beliefs about language, *Int. J. Sci. Educ.*, vol.18, no.1, 1-18, 1996.
- Taylor, E. F. & Wheeler, J. A. (1965). *Spacetime Physics*, Freeman and Company, New York (2nd. Edition 1992).
- Viennot, L., Chauvet, F., Colin, P. & Rebmann, G. (2005). Designing strategies and tools for teacher training: the role of critical details, examples in optics. *Science Education*, 89(1), 13-27.
- Warren, J. W. (1976). The mystery of mass-energy, *Physics Education*, 11(1), 52-54.
- Whitaker, M. (1976). Definitions of mass in special relativity, *Physics Education*, 11(1), 55-57.