

CRÍTICA AL EXPERIMENTO CRUCIAL: MICHELSON Y LA HIPÓTESIS DEL ÉTER (1887- 1930). ALGUNAS IMPLICACIONES PARA LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA (15/17 AÑOS)

A. Drewes y H. Palma

Universidad Nacional de San Martín, Escuela de Humanidades,
Centro de Estudios de Historia de la Ciencia y de la Técnica José Babini.
Provincia de Buenos Aires, Argentina.
E mail: drewes@arnet.com.ar

[Recibido en Marzo de 2006, aceptado en Mayo de 2006]

RESUMEN ^(Inglés)

Se presenta una crítica al concepto de experimento crucial, sobre la base de un análisis histórico de la serie de experimentos interferométricos iniciados por Michelson y Morley (1881-87), y reiterados y refinados por diversos investigadores en las décadas siguientes, basados en la hipótesis de existencia de un medio material o éter para la propagación de ondas luminosas, y desarrollados en un intento de salvar el ajuste entre el formalismo electrodinámico de Maxwell y la Mecánica newtoniana, mediante la postulación de un hipotético sistema de referencia inercial en reposo absoluto.

El análisis del contexto histórico de las teorías físicas entre 1881 y 1930 arroja diversas evidencias acerca de la insuficiencia de la categoría epistemológica de experimento crucial, asociada a interpretaciones lógicas estrechas del cambio de teorías en Física desde posturas logicistas y de reconstrucciones racionales del cambio de teorías, en la línea de M. Bunge.

La discusión se basa en dos líneas argumentativas, respectivamente la caracterización de la noción de éter en las teorías preexistentes a las primeras mediciones interferométricas de Michelson como un término teórico ad hoc, preservado en la formulación (no relativista) de Maxwell (1873) con el fin primordial de consistencia con el marco newtoniano; y un análisis de la virtual irrelevancia de los experimentos interferométricos de Michelson y Morley (1881-87) en la génesis de la Teoría de la Relatividad de Albert Einstein, y por tanto en el cambio de teorías/ paradigmas entre la Mecánica Clásica y la Teoría Especial de la Relatividad (TER).

Se discuten brevemente algunas implicaciones de nuestras conclusiones para la enseñanza y el rediseño del curriculum de Física en contextos CTS (Ciencia-Tecnología-Sociedad) en el nivel Polimodal (15/17 años) en Argentina.

Palabras clave: CTS; Enseñanza Polimodal; Experimento crucial; Física; Michelson.

INTRODUCCIÓN: EXPERIMENTOS CRUCIALES E HISTORIAS EJEMPLARES

Siguiendo el enfoque de Kuhn (Kuhn, 1962), se puede reconocer en los libros de educación científica, así como en las reconstrucciones de las historias disciplinares escritas por científicos, a dos vías por las cuales determinadas tradiciones de investigación, y sus aparatos metodológicos asociados, se han ido perpetuando y validando en el tiempo.

Realimentando la circulación masiva de textos científicos estructurados sobre discursos fuertemente *whig* (Boido, 1993) e incluso ahistóricos, otra tendencia de menor visibilidad pero a nuestro criterio de considerable peso -el uso de categorías lógicas para interpretar la construcción histórica de teorías y los intentos de reducción de los episodios de cambio científico a marcos de análisis estrictamente epistémicos, subvalorando aspectos contextuales sociohistóricos en la producción de hipótesis y teorías (Klee, 2000)-, ha contribuido a afianzar el mito de las reconstrucciones racionales de la historia de las disciplinas científicas.

Dentro de los escenarios elegidos por filósofos e historiadores de la ciencia como arena de prueba para dirimir sus posturas, la función de los experimentos clásicos en etapas de ciencia normal o de consolidación de paradigmas ha sido un instrumento privilegiado a este fin. Y específicamente en el campo de la Física, el experimento de Michelson y Morley de 1887 ha sido y es objeto de controversia en el debate contemporáneo entre especialistas (Holton, 1982), en cuanto a sus alcances y objetivos, y a su relevancia en el último tercio del siglo XIX y comienzos del XX para la construcción de los aparatos conceptuales de la Teoría de la Relatividad Especial (TER) y la Mecánica Cuántica.

La postura de Brush (Brush, 1999), defendida con variantes por Holton (1982) y otros notables especialistas, resume aspectos centrales del debate, invocando la necesidad de tres factores para la aceptación de una teoría, i.e.: su capacidad predictiva y explicativa empírica; su contexto sociohistórico de producción, y su formalismo matemático, asociado a un sentido de lo estético. En relación con este punto, las posturas logicistas que han mantenido la existencia de un cambio de teorías a lo largo de la historia moderna de las ciencias experimentales mediado por reconstrucciones de base racional, se limitan a considerar dentro del mismo al primero de los factores citados, y sólo muy parcialmente al tercero. Consecuencias de esto son no sólo un empobrecimiento considerable de la visión del público acerca de la ciencia como 'construcción' histórica, sino asimismo la persistencia en la enseñanza media y superior de ciencias de visiones distorsionadas del experimento y su alcance en el marco de una teoría determinada.

En relación con las implicaciones educativas de dichas visiones distorsionadas del rol del experimento (crucial) en el cambio de teorías, para el caso concreto del experimento de Michelson-Morley de 1887, Arriassecq y Greca (2004), indican que el rol del experimento de Michelson en la génesis de la Teoría Especial de la Relatividad habría sido menor e indirecto. Sin embargo, la opinión del ambiente científico hasta hace poco tiempo era considerar la TER como un gran éxito teórico, la respuesta finalmente correcta al experimento de Michelson y su continuación natural. Esta postura, avalada por la visión empirista de los propios científicos, ha permeado a los

libros de enseñanza y de divulgación, a tal punto que ni los excelentes libros del curso *Physics* de Berkeley, y las *Feynman's Lectures on Physics* escapan a esta visión.

Estas consideraciones avalan una categoría de Kuhn (Kuhn, 1962), que identifica como "historias ejemplares" a las reconstrucciones clásicas de la historia de la ciencia hechas por científicos, que dieran origen y sustento al mito que intenta presentar, en el debate académico como en el medio educativo, a ciertos experimentos históricos como motores del cambio de teorías científicas.

Por otra parte, otra de las nociones utilizadas por Kuhn (Kuhn, 1962) en su obra ya clásica acerca de la estructura de las revoluciones científicas, remite al acuerdo de una comunidad investigadora en torno al reconocimiento de ciertos fenómenos como problemas, de cara a la construcción de un nuevo paradigma; y, tal como mostraremos en el desarrollo de nuestro trabajo, la cuestión del rango de la hipótesis de éter en la teoría electrodinámica clásica; y la explicación del resultado nulo del experimento interferométrico de Michelson y Morley en relación con la misma, se plantea claramente como un problema para Maxwell, tanto como para otros investigadores como FitzGerald y Lorentz, el primero de ellos proponiendo transformadas específicas que dieran cuenta de un supuesto acortamiento en el recorrido de uno de los haces de luz en el experimento.

ENTRE LA RELATIVIDAD GALILEANA Y LA TER: UN LARGO VIAJE A LA LUZ DE LAS ESTRELLAS

En el marco de la teoría electromagnética de Maxwell, vale recordar que un medio material - el llamado éter luminífero -, era invocado como soporte natural necesario para la propagación de ondas electromagnéticas, en forma análoga a lo que sucedía con las ondas sonoras. El problema de la existencia y naturaleza de un medio material como el éter en términos de un fluido sutil, no viscoso e incompresible que actuaría como medio de propagación de ondas luminosas, era una cuestión controvertida entre los físicos desde mediados del siglo XIX.

A partir de la aparición del *Treatise on Electricity and Magnetism* de James Clerk Maxwell (1873), la integración de los fenómenos ópticos y electromagnéticos en un campo conceptual unificado supuso la transferencia de los problemas del primer campo al segundo. En el programa de Maxwell, siguiendo la línea de experimentos clásicos como el de Arago (Hiroshige, 1966), hay intentos de detectar posibles cambios en la velocidad de propagación de ondas luminosas, en el marco de mediciones de la velocidad de la luz hechas respecto de medios en movimiento. El ensayo, a la postre frustrado, de poner bajo el marco conceptual de una única transformación de coordenadas espacio-temporales a las ecuaciones de onda electromagnéticas y mecánicas, sería en un sentido extremadamente fructífero. El problema llevaría por un lado a numerosas replicaciones y refinamientos de los experimentos iniciales de Michelson y Morley (1881-1887) -incluso en los años '30, a posteriori del surgimiento de la Teoría de la Relatividad en sus dos formulaciones-; y por otra al surgimiento de la teoría relativista de A. Einstein.

A comienzos del siglo XIX, un problema clave para la comunidad investigadora era la explicación del fenómeno de aberración de la luz estelar. Arago, Fresnel y Stokes entre otros, desarrollaron modelos teóricos o experimentos para elucidar el estado de movimiento del éter con respecto a la Tierra (Harman, 1982). Entre las hipótesis propuestas, la de mayor interés para nuestra discusión fue la debida a Fresnel, invocada por Michelson y Morley en su trabajo original de 1887 como explicación completa y satisfactoria del fenómeno (*complete and satisfactory explanation of aberration*) (Michelson y Morley, 1887).

De acuerdo con la hipótesis ondulatoria de la luz propuesta por Fresnel (1818), la velocidad v de un tren de ondas luminosas atravesando un medio de índice de refracción n sería:

$$c/n = \left[1 - 1/n^2 \right] v \quad (1)$$

a partir de suponer que la Tierra se estaría desplazando a través de una corriente de éter, creando un "viento de éter" a lo largo de su movimiento orbital. Esta hipótesis, para la época de los primeros experimentos interferométricos de Michelson, daba cuenta tanto del fenómeno de aberración estelar -descubierto por Bradley en 1728- como del resultado nulo del experimento de Arago de 1810 en términos de detección de variaciones en la velocidad de la luz al atravesar un medio material en movimiento. La adopción de este punto de vista por parte de Maxwell, y su sugerencia (1878) de que sería posible medir la velocidad de la Tierra respecto del éter utilizando mediciones de la velocidad de la luz en diferentes direcciones, habrían sido el motivo para que un experimentador consumado como Michelson se propusiera diseñar un dispositivo interferométrico apto para medir dicho efecto, cuya magnitud resultaría según Maxwell sumamente pequeña, incluso fuera del límite de detección de los instrumentos ópticos de la época.

MAXWELL Y UN EXPERIMENTO DE 1864 SOBRE REFRACCIÓN DE LA LUZ

Luego de haber trabajado desde los años 50 en el problema de la propagación de la luz y en el desarrollo de un formalismo para integrar fenómenos ópticos como la reflexión y la refracción en una teoría electromagnética general, sobre la base de existencia de un medio material de transmisión de ondas mecánicas y lumínicas, Maxwell realizó en abril de 1864 un experimento para determinar el posible efecto del movimiento terrestre sobre la refracción de la luz (Harman, 2001), mediante un dispositivo consistente en dos telescopios enfrentados, con un arreglo de tres prismas intermedios y un espejo plano en el segundo telescopio para reenfoque los haces de luz al primero, siendo la hipótesis a comprobar, en la línea de un experimento previo de Fizeau de 1851 (Fizeau, 1859), la detección de un posible corrimiento entre el camino óptico de los rayos emergentes e incidentes en su recorrido refractivo entre ambos telescopios, debido al arrastre del mar de éter en que se suponía se movería la Tierra.

Sin embargo, los cálculos de corrimiento previsto por efecto de arrastre de éter hechos por Maxwell resultaron decididamente negativos para la hipótesis de

movimiento del éter (Harman, 2001); y este debió luego incorporar una corrección por efecto de borde para interpretarlos, en base a una sugerencia de Stokes. En marzo de 1879, dirige una carta al astrónomo norteamericano David Peck Todd, donde incluye una propuesta de detección del arrastre de éter por experimentos basados en la medición de la velocidad de haces de luz propagándose en direcciones opuestas. La carta, publicada en 1879 en *Nature* y en los *Proceedings* de la Royal Society, sería la pista que conduciría a Michelson a sus experimentos interferométricos de 1881- 1887 y posteriores.

Así, en términos lakatosianos, la existencia del éter sería una hipótesis (de conveniencia) formando parte del núcleo duro del programa del electromagnetismo durante el último cuarto del siglo XIX. La documentación histórica y la naturaleza de los observables y términos teóricos implicados en los experimentos ópticos realizados por diferentes investigadores hasta 1887 muestran no solamente la falta de apoyo empírico para la hipótesis de éter en Maxwell, sino su frágil sustento teórico debido a la falta de comprensión, para la época, de los resultados experimentales en términos de una teoría unificada para los fenómenos ópticos y electromagnéticos. Este hecho y las críticas posteriores de Poincaré y otros a la hipótesis de existencia del éter desde el campo epistemológico, son evidencias fuertes en contra de la asignación de un carácter de experimento crucial o *experimentum crucis* al experimento interferométrico de Michelson y Morley de 1887. Aunque para especialistas como Buchwald (1985) sin embargo, el estado de movimiento de los cuerpos no habría sido un problema central en Maxwell, bajo nuestro punto de vista, serían las críticas desde el campo epistemológico en torno al rango de la hipótesis de existencia del éter en el *Treatise*, las que iban al fin a poner en evidencia su carácter superfluo en el programa maxwelliano

POINCARÉ SOBRE MAXWELL: ÉTER, HIPÓTESIS AD HOC Y METAFÍSICA

En una reseña crítica al *Treatise* de Maxwell (Poincaré, 1905), el notable físico francés Henri Poincaré realiza una serie de consideraciones críticas acerca de la naturaleza de la hipótesis de éter en la electrodinámica de Maxwell de gran interés en el contexto de la presente discusión. La misma se inicia con una valoración de la teoría ondulatoria de Fresnel en la construcción del corpus teórico de la Óptica de la época, y pasa inmediatamente a formular una distinción tajante entre los objetivos de las teorías físicas y los postulados metafísicos; y caracteriza la postulación por parte de Maxwell de existencia del éter como medio de transmisión de ondas luminosas como hipótesis de conveniencia. El siguiente párrafo en traducción propia de la edición inglesa de 1905 del libro de Poincaré es ilustrativo al respecto:

"La teoría denominada teoría de ondulaciones forma un conjunto completo, que resulta satisfactorio al intelecto; pero no debemos pedirle lo que no puede brindarnos. El objeto de las teorías matemáticas no es revelarnos la naturaleza real de las cosas; eso sería una exigencia irrazonable. Su único objetivo es coordinar las leyes físicas con las que los experimentos físicos nos han familiarizado, el enunciado de las cuales, sin ayuda de la Matemática, seríamos incapaces de efectuar."

Que el éter exista o no importa poco - dejemos ese punto a los metafísicos -; lo que es esencial para nosotros es que todo ocurre tal como si existiera, y que esta hipótesis se ha encontrado adecuada para la explicación de los fenómenos. Después de todo, ¿tenemos alguna otra razón para creer en la existencia de objetos materiales? Esa, también, es sólo una hipótesis de conveniencia; y nunca dejará de ser así, mientras que algún día, sin duda, el éter será dejado de lado como inútil."

(Poincaré, 1905, p. 215. Citado en Ward & Throop, 2002)

Seguidamente, Poincaré se ocupa de remarcar que la teoría ondulatoria se fundamenta en la "hipótesis molecular", añadiendo significativamente que dicha hipótesis jugaría sin embargo un rol secundario, pudiendo de ser preciso sacrificar la misma (frente a su invalidación en la contrastación contra observables). A su criterio, el aporte que las teorías físicas -óptica y electromagnética- habrían recibido de la misma sería reducible al principio de conservación de la energía y al principio de mínima acción, relacionado con la explicación de todo fenómeno físico sobre la base de la variación en el tiempo t de parámetros empíricos q . Consecuencia de este razonamiento es la interpretación de las leyes de movimiento de la materia ordinaria y de fluidos -incluido el ubicuo éter- en términos de ecuaciones diferenciales lineales vinculando las moléculas de masa m , los valores del parámetro q correspondiente y el tiempo t .

En esta línea de análisis, la forma en que Maxwell introduce su noción de éter como medio material soporte de interacciones electrostáticas en un dieléctrico, *via* transmisión de presiones, no era contemplada por Poincaré como una formulación estrictamente mecánica.

Las posturas de Poincaré y Maxwell reflejan bastante más que un áspero debate académico entre expertos. Muy por el contrario, la lectura de Poincaré del modelo de Maxwell y la hipótesis de éter en el *Treatise* es interpretable como emergente del debate entre dos escuelas filosóficas, y de dos tradiciones diferenciadas y divergentes en la investigación en Física -la francesa, de orientación fuertemente matematizante y logicista, afiliada en el caso de Duhem y el mismo Poincaré al *convencionalismo*; y la británica, que seguía heredando el peso del programa newtoniano, e intentaba en forma sistemática el ajuste de las nuevas observaciones al marco teórico de los *Principia* .

De este modo, Maxwell procura salvar la noción de éter incluso a riesgo de sostener la misma como hipótesis ad hoc, sin sustento empírico; mientras que Poincaré sostiene su virtual irrelevancia en el escenario del ajuste entre formalismo matemático de la teoría y datos observables, y de su carácter superfluo frente al ajuste formalismo/ datos de observación, llegando a caracterizar la hipótesis maxwelliana de éter como una categoría *metafísica*.

A su vez, la hipótesis molecular de Poincaré sobre el éter sería retomada por FitzGerald y Lorentz en el desarrollo de un programa competitivo con el programa relativista, que asumía como hipótesis de partida la existencia de un supuesto éter *de naturaleza molecular* como medio de transmisión de las ondas luminosas. Dicho

programa intentaría explicar el resultado negativo del experimento interferométrico de Michelson y Morley desde 1887 a 1930.

En resumidas cuentas, tenemos que entre 1873 y 1905, al resultado nulo de una larga serie de experimentos destinados a comprobar el efecto de arrastre de éter por mediciones de velocidad de propagación de ondas luminosas, se le habría sumado la coexistencia de hipótesis y modelos de éter *carentes de apoyo empírico*.

En efecto, otras lecturas y revisiones críticas al modelo maxwelliano de éter se sumarían a la de Poincaré (Harman, 2001: 8-9). Así, William Thomson, en una lectura crítica del *Treatise* en relación con el modelo de éter implicado en la construcción del mismo, en sus *Lectures on Molecular Dynamics and the Wave Theory of Light* en la Johns Hopkins University (1884), manifestaba que la teoría electromagnética de Maxwell representaba un paso atrás en su renuncia a proveer de un modelo mecánico para fundamentar una teoría dinámica del electromagnetismo; y -entre otros- Pierre Duhem (Duhem, 1954) remarca en 1904 en una reseña crítica al *Treatise* la necesidad de modelos estrictamente mecánicos, de cara a una interpretación inteligible del comportamiento de los sistemas físicos.

En consecuencia, el programa de Lorentz y FitzGerald se propondría elaborar un modelo de éter *de naturaleza molecular* que diera cuenta del resultado nulo de los experimentos interferométricos; y a la vez, validar la hipótesis de arrastre de éter de Fresnel de 1818. Dicho programa, no obstante la falta de apoyo empírico a su hipótesis ad hoc sobre la naturaleza del éter, intentaría mantenerse, a través de la puesta a punto de una larga serie de experimentos, incluso luego del año 1919 y de la primera evidencia experimental a favor de la formulación de la Mecánica relativista.

Esta cuestión es retomada en las conclusiones, en relación con la insuficiencia del experimento de Michelson-Morley como supuesto experimento crucial guiando el cambio de teorías, entre la Mecánica clásica y las formulaciones relativista y cuántica.

MICHELSON Y MORLEY (1887): TRAS LA ESTELA DEL ÉTER

Los detalles experimentales del arreglo interferométrico de Michelson y Morley son suficientemente conocidos (Harré, 1986: 116) y no insistiremos en su descripción, recordando sin embargo que la parte esencial del montaje constaba de una fuente de luz monocromática unida a dos brazos perpendiculares de longitudes l_1 y l_2 , con sendos detectores en sus extremos. Características adicionales del montaje, incluyendo el emplazamiento del sistema óptico en una cuba llena de mercurio para evitar vibraciones, y la incorporación de una batería de espejos para aumentar el camino recorrido por la luz en cada brazo y amplificar las posibles diferencias, fueron incorporadas a lo largo de sucesivas repeticiones del experimento, realizadas entre el primer ensayo de Michelson (1881) y el último realizado con su participación (1929).

Recordando que la hipótesis de Michelson-Morley equivale a la detección de un desfase temporal Δt en la señal recibida por cada uno de los detectores, generado por la diferencia de recorrido entre los haces de luz perpendiculares en cada brazo del dispositivo interferométrico y evidenciado por un desplazamiento d en el patrón

obtenido de líneas interferométricas, un cálculo elemental de dicho parámetro despreciando términos de cuarto orden (Michelson y Morley, 1887: 336) da por resultado:

$$d = 2 D v^2/c^2 \quad (2)$$

donde $D = l_1$ o l_2 luego de una rotación del interferómetro, v es la velocidad de fuente y detectores respecto del éter considerado en reposo, y c es la velocidad de la luz *respecto del éter*, supuesto en reposo absoluto. Los investigadores expresaron sus resultados de 1887, obtenidos de una cuidadosa serie de 6 mediciones promediadas a dos horarios (ca. 12 a.m. y 6 p.m.) entre julio 8 y julio 12 de 1887, en términos del cociente entre los valores real y esperado del desplazamiento interferométrico. El mejor valor para dicho factor sin embargo resultaría de 1/20, muy por debajo del límite de detección, contrariando la hipótesis de partida. Frente a dichos resultados, Michelson y Morley ensayan variadas argumentaciones, entre ellas:

- a. La omisión de la consideración del movimiento terrestre en forma solidaria con el sistema solar, fenómeno que reconocen como escasamente conocido para la época.
- b. Insuficiente extensión de la serie de mediciones, a subsanar mediante la repetición de las observaciones a intervalos de 3 meses.
- c. Limitación de las mediciones a un punto en la superficie terrestre, y omisión de ensayos a mayores alturas, donde el efecto del "viento de éter" sería perceptible (Michelson y Morley, 1887: 341, *Supplement*).
- d. La insuficiente amplificación del factor v^2/c^2 , proporcional al efecto de aberración, en el arreglo experimental usado.

EL EXPERIMENTO DE MICHELSON-MORLEY Y SU CONTINUIDAD EN EL TIEMPO

En sus conclusiones, los autores no hacen referencia alguna al resultado nulo del experimento en términos de una *refutación* de la hipótesis del éter; sí en cambio, se puede leer la siguiente frase, harto significativa en el contexto de discusión:

"It appears, from all that precedes, reasonably certain that if there be any relative motion between the earth and the luminiferous ether, it must be small; quite small enough entirely to refute Fresnel's explanation of aberration"

(Michelson y Morley, 1887, p. 341).

De la misma se infiere que el fracaso en la contrastación de la hipótesis puesta a prueba no es considerado por Michelson y Morley como refutación de sus teorías previas; por el contrario, los investigadores se proponen ensayar diseños experimentales alternativos y afianzar la fiabilidad estadística de sus resultados. Esta primera conclusión contradice en forma clara la interpretación del resultado nulo del experimento (Harré, 1981) en términos de su encuadre como experimento crucial (Kuhn, 1983) de primera especie.

En efecto, la operación lógica de contrastación en este caso asume que las dos hipótesis contradictorias en conflicto H_1 y H_2 , deberían conducir a una consecuencia observacional O_1 o a su negación O_2 , a partir de la contrastación de una u otra hipótesis con la base empírica, siendo suficiente con una sola observación O (pertinente) para decidir si O_1 (u O_2) son falsas, y por extensión si H_1 o H_2 lo son. En general, estas situaciones darían lugar, *en un marco hipotético deductivo en versión compleja* (falsacionismo), a asumir la refutación de las teorías asociadas a la hipótesis no validada por la observación. En el caso analizado, el análisis de fuentes históricas muestra que la configuración histórica del experimento introduce numerosos factores que invalidan dicha postura reduccionista, concretamente:

1. La consecuencia observacional obtenida no habría sido interpretada como refutación de una hipótesis H_1 (existencia de éter) y por tanto no resulta pertinente, no solamente por Michelson y Morley, quienes continuaron replicando en varias ocasiones el experimento hasta 1929, sino por varios de los más eminentes especialistas de la época: por ejemplo, Lorentz (1895); Miller (1921-24 y 1926); Illingworth (1927) y Joos (1930). En particular, Lorentz, en base a una sugerencia de FitzGerald, desarrolló una transformada específicamente para justificar su hipótesis (ad hoc) de que el resultado nulo obtenido se debería a una "contracción" del camino óptico de la luz en el brazo más largo del interferómetro por efecto de su interacción con un hipotético *éter molecular*; que compensaría exactamente la diferencia de fase interferométrica esperada.
2. En este sentido, y considerando el hecho de que la formulación relativista da cuenta del carácter superfluo de la noción de éter en el programa de Lorentz y la sustituye por la de *campo*, en forma consistente con los datos de observación (deflexión de la trayectoria de la luz en presencia de campos gravitatorios intensos), los experimentos de Michelson y Morley del período 1881-87 -tomados en forma individual o en conjunto-, en tanto que realizados bajo la asunción de validez de dicha hipótesis, nunca podrían ser tomados como experimentos cruciales que dieran lugar a la Teoría de la Relatividad en su formulación restringida.
3. En el experimento inicial de Michelson-Morley, como en sus numerosas refinaciones y replicaciones posteriores, el supuesto carácter crucial no sería tal, pues la invalidación de la hipótesis ensayada no solamente no conduce a asumir la validez de la hipótesis contraria H_2 (inexistencia de éter), sino que el cambio de teoría correspondiente se da recién a partir de en 1919 con el primer apoyo observacional consistente a la teoría general de la relatividad (expedición dirigida por Arthur Eddington y primer registro de deflexión de la luz en presencia de un campo gravitatorio).
4. Los modos de argumentación de varios de los investigadores citados, de cara a la interpretación de consecuencias observacionales, recurren a criterios como: (a) hipótesis ad hoc, (b) insuficiencias en el propio marco teórico, (c) insuficiente fiabilidad estadística de los datos experimentales. La combinación de todas estas formas discursivas hace a la hipótesis ensayada muy

escasamente compatible con la configuración de un supuesto experimento crucial, y la dota de aspectos vinculados a contextos de incertidumbre, que se combinan con los condicionantes sociológicos complejos que definen la aceptación de teorías (Brush, 1999: 184).

EL EXPERIMENTO DE MICHELSON - MORLEY DE 1887 Y LA TER

Es de interés aquí analizar el peso que le otorgan los documentos históricos al tópico -recurrente en las historias de la ciencia escritas por físicos y en libros clásicos de enseñanza superior, ya citados- de la influencia de los mismos en el surgimiento de la teoría de la Relatividad. De hecho, una cita original del propio Einstein, incluida, en nuestra traducción, en una carta suya dirigida a la Cleveland Physics Society del 19 de diciembre de 1952:

“La influencia del famoso experimento de Michelson-Morley, de acuerdo a mis propias reflexiones, ha sido bastante indirecto. He sabido del mismo a través de las decisivas investigaciones de H. A. Lorentz sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento (...) El experimento de Michelson-Morley (...) me pareció artificial. Lo que me condujo directamente a la Teoría Especial de la Relatividad fue la convicción de que la fuerza electromotriz inducida en un cuerpo en movimiento en un campo magnético no era más que un campo eléctrico. Pero también fui guiado por el resultado del experimento de Fizeau y el fenómeno de aberración. No hay, por supuesto, ningún camino lógico que conduzca al establecimiento de una teoría, sino sólo un conjunto de intentos para su construcción, controlados por cuidadosas consideraciones del conocimiento fáctico.” (Holton 1988: 303).

junto con otras expresiones en el mismo sentido, tomadas de su correspondencia con Solovine y Mach, indican que el sustento teórico para el desarrollo de la teoría relativista en su versión restringida habría sido esencialmente la reformulación por Lorentz de la teoría electromagnética de Maxwell, por una parte; y por otra, desde lo empírico-metodológico, el experimento de Fizeau (1851), que informaba acerca de variaciones en la posición de las franjas de interferencia al paso de luz a través de una masa de agua en movimiento.

Pero aún de mayor interés resulta analizar con algún detalle la fundamentación filosófico-epistemológica de la TER -absolutamente lejana de toda referencia al inductivismo o a variantes del empirismo corrientes en la época- e influenciada en cambio por la postura fenomenológica de Ernst Mach (Kuhn, 1983).

En carta a Solovine, Einstein describe su método de investigación como *"un intento de organizar la caótica diversidad de información brindada por la experiencia perceptiva en un sistema de pensamiento lógico unificado."* (Holton, 1979)

Un diagrama explicativo, denominado esquema EJASE, que completa el texto epistolar, resume en forma clara su concepción epistemológica en torno a la correlación axiomática-teoría-datos inductivos. En el contexto del mismo (Kuhn, 1983), el conjunto de experiencias directas (sensibles) se representa por una línea E,

mientras que un punto de convergencia A indica el sistema axiomático asociado al formalismo de la teoría, simbolizando los puntos intermedios S, S',..... S'''' los enunciados inferidos. Una flecha curvada J en sentido E-A, por su parte, denota la relación establecida entre el mundo experiencial y los postulados axiomáticos.

Extremadamente relevante en relación con la forma que asume el cambio de teorías en este episodio de la historia de la ciencia resulta la afirmación explícita de Einstein, de imposibilidad, por medio de la inducción generalizada, de ningún camino lógico de E hacia A, habiendo en cambio a su criterio apenas una relación intuitiva (psicológica) entre ambas instancias, siempre sujeta a invalidación (Holton, 1981).

Esta configuración define lo que el propio Einstein llama el "primer salto lógico" en el proceso de descubrimiento o formalización, estando el segundo salto lógico asociado a las correlaciones recíprocas de los conceptos (*Begriffe*): entidades y términos teóricos dentro de la formulación de la axiomática específica.). En términos del propio físico alemán, serían "no solamente los conceptos, sino todo el corpus de teoría, una libre creación (de la conciencia) humana, que solamente halla justificación en el éxito pragmático del aparato conceptual integral, y es controlada conforme al panorama de conjunto que otorga la experiencia sensorial", añadiendo seguidamente que, a su criterio, no existiría camino lógico alguno que conduzca a las leyes elementales de la Física, sino la intuición apoyada en la impresión experiencial.

En forma harto significativa, comenta Einstein finalmente que "el procedimiento (de elaboración de hipótesis y teorías) precisamente considerado, pertenece a la esfera extralógica (intuitiva), puesto que las condiciones en las cuales la experiencia E presenta los conceptos S no son de naturaleza lógica" (Holton, 1981).

No casualmente, los críticos de esta concepción epistemológica plantearon a Einstein una objeción del mismo orden que la que recibiría Kuhn a su categoría de paradigma (Lakatos, 1965); es decir, haber sobrevalorado el rol de la intuición en los procesos cognitivos de investigación de las ciencias físicas. Cabe observar que una adecuada lectura del diagrama EJASE admite una dinámica de circulación bidireccional E-J-A-S-E, asociada a una definida *asimetría* E-A, que asegura un continuo proceso de reajuste entre la base empírica, los enunciados de una determinada axiomática, y las leyes derivadas. Resultan evidentes las considerables incompatibilidades entre este planteo y los intentos de enmarcar el *corpus* de las ciencias físicas en marcos axiomáticos rígidos, y a los enunciados e hipótesis en términos de principios de legalidad; y sobre todo, resulta clara la función asignada por Einstein al experimento de mera instancia de ajuste entre el aparato lógico formal del sistema axiomático *interpretado* y los datos de observación generados por la base empírica perceptiva.

La autobiografía del propio Einstein (Einstein, 1995); y mucho antes su famoso *paper* de 1905 en los *Annalen der Physik*, intitulado "Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento" (Einstein, 1905), aportan otros datos que afirman la irrelevancia del experimento de Michelson-Morley en la génesis de la TER; mientras que en la excelente obra divulgativa de Pais (1983) es posible hallar una buena información ampliatoria acerca de su concepción del experimento; finalmente, en Berkson (1995) es posible encontrar un abordaje conciso y claro acerca del formalismo de las teorías de campo.

EL EXPERIMENTO DE MICHELSON-MORLEY (1887) A LA LUZ DEL ESQUEMA EJASE

Un examen elemental del esquema lógico-intuitivo einsteiniano muestra que dentro del mismo no existe lugar para el experimento como motor del cambio de teorías, estando reducida exclusivamente su función metodológica a proveer, mediante sucesivos reajustes, nueva información de la base empírica, esencialmente de origen sensorial-perceptivo. Esta postura implica el reconocimiento de la necesidad de disponer de ciertos criterios subjetivos -tanto como con acuerdos sociológicos de la comunidad investigadora en un cierto contexto histórico-, de cara a la evaluación de la relevancia y alcance de resultados de un experimento (Brush, 1999).

Esto avala otra tesis de Kuhn, i.e., la de que los experimentos (cruciales) no sirven para la comprobación de teorías, de donde la concordancia entre teoría y observación sería por tanto un mero criterio para la viabilidad de las técnicas e instrumentos utilizados (Kuhn, 1961). Otro apoyo para este punto de vista lo dan numerosas evidencias de la falta de apoyo empírico tanto para la TER como para el programa de Lorentz, en particular hasta 1919; hecho que, sumado a las muy diferentes condiciones y períodos históricos de aceptación de la TER en las comunidades científicas alemana, británica y norteamericana (Brush, 1999), termina de poner en evidencia la simplificación extrema e inviable del programa de reconstrucción racional de teorías científicas, en cuanto a asumir la fundamentación de teorías meramente en datos de observación, y su pretensión, en términos de Mario Bunge, de "trascender la subjetividad" para comprender la esencia de la realidad (objetiva).

En resumidas cuentas, los episodios históricos asociados al cambio de teorías pueden muy bien, como en este caso, desarrollarse a lo largo de varias décadas, siendo aceptadas las nuevas formulaciones sólo lentamente y luego de arduos procesos de negociación y debate; e incluso las reacciones de la comunidad de especialistas en diferentes países suelen mostrar comportamientos harto diferentes: para ilustrar este punto, baste mencionar que la TER fue aceptada masivamente en Francia recién en los años 50, mientras que en Alemania ya hacia 1911 se había producido la conversión al nuevo paradigma de la mayoría de los investigadores líderes.

SÍNTESIS FINAL

El análisis de un experimento clásico en la historia de la Física como el experimento interferométrico de Michelson y Morley (1887), permite inferir que el mismo no es en modo alguno reducible a la categoría lógica de experimento crucial, no siendo las hipótesis involucradas en absoluto de tipo "legaliforme", sino por el contrario enunciados asumidos como provisorios y sujetos a incertidumbre por parte de los científicos involucrados, y particularmente sensibles a las contingencias históricas del contexto de descubrimiento y validación.

Aún en períodos históricos (1905-1930) de consolidación de formulaciones como la relativista de cara a resolver un problema crítico para la comunidad investigadora, se halla que una parte apreciable de la misma opta por intentar validar una hipótesis *sin apoyo por contrastación* con la base empírica. Esto sitúa al experimento y a sus

hipótesis en el marco de unas coordenadas históricas y sociológicas específicas que relativizan en forma notable su posible carácter lógico legaliforme, sostenido por autores como M. Bunge (Bunge, 2002). Esta situación es potenciada por visiones distorsionadas de los episodios de cambio de teorías en textos de divulgación y de enseñanza de ciencias, asociadas a traducciones no válidas/ alteraciones del significado de los términos teóricos y formalismos originales de las teorías, y/ o con concepciones anacrónicas de las situaciones analizadas, en una implícita defensa de la existencia de *procesos de ciencia sin sujeto*.

La configuración de un experimento histórico clave (Gilbert y Mulkay, 1984: 105-107) involucra coordenadas irreducibles al análisis lógico, e incluso extrarracionales, i.e. las particulares condiciones sociohistóricas del contexto de producción de teorías; la dinámica social de la comunidad investigadora de origen donde se genera la nueva contribución teórico-metodológica; los marcos referenciales metafísicos y epistémicos asumidos por el investigador, etc.

Las consideraciones anteriores avalan en el estudio de caso analizado, la existencia ubicua de las que Thomas Kuhn (Kuhn, 1962) caracterizara como historias -reescrituras o reconstrucciones- ejemplares (míticas) de la historia de la ciencia, paradigmáticas en los textos de educación científica y en las historias disciplinares de fines del siglo XIX y comienzos del XX escritas por científicos, que tienden a reinterpretar los resultados de experimentos históricos y el alcance de teorías de acuerdo a la perspectiva del conocimiento actual, y a borrar los contextos de producción originales, las controversias, etc.

CONSIDERACIONES SOBRE LAS IMPLICACIONES PARA LOS CONTENIDOS CURRICULARES DE FÍSICA (15/17 AÑOS) EN EL CASO ARGENTINO

En relación con los contenidos curriculares de ciencias y en especial de Física y relacionados (Química) de nivel Polimodal (15/ 17 años) en Argentina, afectados por la Reforma Educativa surgida de la Ley Federal de Educación (24.195/1993), una consecuencia grave de los modelos de ciencias descontextualizados y afines a concepciones de ciencia logicistas, es la persistencia de prácticas docentes y de libros de texto que asignan un rol meramente funcional al experimento dentro de la organización de los trabajos prácticos; que por otra parte no presentan el experimento en contexto sociohistórico, y lo supeditan a un mero nivel de "aplicación" de los contenidos teóricos. En muchos aspectos, la desactualización de los enfoques histórico-epistemológicos de los contenidos de ciencia enseñada en el caso argentino responde a los mismos problemas de fondo apuntados por Kuhn en su texto ya clásico (Kuhn, 1962).

En especial, recogiendo para los espacios curriculares de Física y disciplinas relacionadas (Química) en el nivel Polimodal en Provincia de Buenos Aires (Argentina), resultados de un proyecto de investigación educativa (2001-2005) desarrollado bajo la dirección de uno de nosotros (Drewes, Iuliani, 2001), hemos encontrado en nuestro relevamiento del sistema que la práctica de enseñanza de esta disciplina muestra las siguientes problemáticas:

- Formación de profesores con concepciones acríticas y desproblematizadas de ciencia escolar, y reproducción de las mismas en la práctica de aula.
- Ausencia de procesos de ciencia enseñada acordes con los presupuestos de las llamadas Nuevas Filosofías de la Ciencia, en términos de fundamentación de sus aspectos histórico-filosóficos (Del Carmen, 1997).
- Abundancia de profesores reacios a reflexiones profundas sobre la naturaleza de sus prácticas.
- Herencia de la tradición académica (Davini, 1995) en la formación de los profesores de ciencias, que asume a los contenidos conceptuales y procedimentales de las ciencias experimentales como "autosuficientes" para la construcción de conocimientos.

Por otra parte, críticas de distinto orden a este tipo de modelos de ciencia basadas en enfoques investigativos (Ramírez Castro y col., 1994) y en enfoques CTS (Ciencia-Tecnología-Sociedad), han sido presentados en diversos trabajos previos (Drewes, Iuliani, 2003), en forma paralela al programa en curso (2001-2006) de edición de módulos CTS de las unidades didácticas Química Salters adaptados al currículo de Química de nivel Polimodal en Argentina (Drewes, Iuliani, 2004), programa desarrollado en coordinación con el profesor Aureli Caamaño (Direcció d'Ensenyament, Generalitat de Catalunya), y con la gentil autorización de los autores originales (York University, UK, Science Education Group).

Una seria consecuencia de estos enfoques de las prácticas docentes en el caso argentino ha resultado de hecho comparable al caso español (Solbes y Vilches, 1992): es decir, fracasos escolares generalizados, y creciente desinterés por el aprendizaje de ciencias, reflejado en bajas tasas de opciones por la modalidad de Ciencias frente a otras en el nivel Polimodal.

UNA APROXIMACIÓN A LA RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

En nuestro caso, hemos trabajado sobre el cuadro de situación descrito en el campo de la investigación teórica (enfoques CTS), como a nivel de la formación del profesorado de ciencias (UNSAM, Escuela de Humanidades, Licenciatura en Enseñanza de las Ciencias, *Seminarios de Historia de las Ciencias Experimentales 2000-2004*, a cargo de los profesores Diego Hurtado de Mendoza y Alejandro Drewes), desde un marco teórico que contempla una concepción integrada de aspectos curriculares, metodológicos y de fundamentación de contenidos de enseñanza de ciencias en contextos Ciencia-Tecnología-Sociedad (CTS) y de resolución de problemas en contextos de investigación (Ramírez Castro y col, 1994).

Transformación de contenidos de Física en situaciones problemáticas

El Proyecto de Cátedra de los citados Seminarios (Hurtado de Mendoza y Drewes, 2004), desarrollado en nuestro centro para resolver las problemáticas de enseñanza planteadas, se apoya en el diseño de unidades didácticas sobre ejes CTS y de resolución de problemas, orientadas al cambio conceptual y metodológico de los

profesores, y a una fuerte revisión de sus modelos de ciencias, y de cambio de teorías/ paradigmas, reorientando los contenidos sobre ejes interdisciplinarios que susciten intereses y compromisos éticos y afectivos en los alumnos con el objeto de conocimiento científico desde la historia de su construcción.

De las mismas, incluimos a modo de ejemplo ilustrativo una en el **Anexo 1**, llevada a campo en el nivel Polimodal.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARRIASSECQ, I. y GRECA, I (2004). Enseñanza de la teoría de la relatividad especial en el ciclo polimodal: dificultades manifestadas por los docentes y textos de uso habitual. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias* 3, 2 , pp. 55-69.
- BUCHWALD, J. (1985). *From Maxwell to Microphysics. Aspects of the Electromagnetic Theory in the last Quarter of the Nineteenth Century*. Chicago: The University of Chicago Press.
- BERKSON, W. (1995). *Las teorías de los campos de fuerza*. Madrid, Alianza Universidad.
- BUNGE, M. (2002). *Epistemología*. Buenos Aires: Siglo XXI Editores.
- BOIDO, G. (1993). La polémica sobre el enfoque whig en la historia de la ciencia, *Análisis filosófico* XIII, 2, pp. 123-131.
- BRUSH, S. (1999): Why was Relativity accepted? *Phys. perspect.* 1, pp. 184-214.
- DAVINI, M.C. (1995). Tradiciones en la formación de los docentes y sus presencias actuales. *La formación docente en cuestión: política y pedagogía*. Buenos Aires - Barcelona - México: Paidós, Serie Cuestiones de Educación., pp. 19-50.
- DEL CARMEN, L. (comp.) (1997). *La enseñanza y el aprendizaje de las ciencias de la Naturaleza en la Educación Secundaria*. Barcelona: Horsorí, ICE de la Universitat Autònoma de Barcelona
- DREWES, A., IULIANI, L. (2001). *Ministerio de Educación de la República Argentina, sitio "Calidad" del Programa de Promoción de la Calidad de la Educación Superior, Capacitación Docente para el Fortalecimiento de Disciplinas Núcleo en las Universidades Nacionales. Convocatoria Piloto junio 2000. Proyecto: Química, Física y Medio Ambiente: un Proyecto basado en el enfoque CTS para la Formación del Profesorado de Química en el Nivel de Educación Superior. En línea en: <http://www.ses.me.gov.ar>*.
- DREWES, A. y IULIANI, L. (2003). El enfoque CTS por situaciones problema: una propuesta para el aprendizaje de contenidos de contaminación ambiental. *Alambique*, 35, pp. 90-99.
- DREWES, A., IULIANI, L. (2004). Resultados de adaptación do Projeto Salters na curricula argentina da Química/ Resultados de adaptación del Proyecto Salters a la currícula de Química en Argentina. *Perspectivas Ciência-Tecnologia-Sociedade na Inovação da Educação em Ciência. Memórias del III Seminario Ibérico "CTS y enseñanza de las ciencias"*. Aveiro, Portugal, junio 28 - 30 2004, pp. 73-80.
- DUHEM, P. (1954). *The Aim and Structure of Physical Theory*. Princeton: Princeton University Press.

- EINSTEIN, A. (1905). Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik* 17, pp. 891 - 921
- EINSTEIN, A. (1995). *Autobiografía y escritos científicos*. Barcelona: Círculo de Lectores.
- FIZEAU, H. (1859). Sur les hypothèses relatives à l' éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer la vitesse avec laquelle la lumière se propage dans leur intérieur. *Annal. de Chimie et Physique*, troisième série, LVII, pp. 385-404.
- GILBERT, G. N. y MULKAY, M (1984). Experiments are the key: participants' histories and historian's histories of science. *Isis, Critiques & Contentions*, pp. 105-125.
- HARMAN, P. (1982). *Energy, Force and Matter. The conceptual development of nineteenth-century Physics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- HARMAN, P. (2001). *The Natural Philosophy of James Clerk Maxwell*. Cambridge, Cambridge University Press, pp. 152-164. Versión castellana: Harman, P. M. (1982). *Energía, fuerza y materia. El desarrollo conceptual de la física del siglo XIX*. Madrid: Alianza.
- HARRE, R. (1981). *Great Scientific Experiments: Twenty Experiments that Changed our View of the World*. Oxford - New York: Oxford University Press, Cap. 11, pp. 115-124.
- HIROSIGE, T. (1966). Electrodynamics Before the Theory of Relativity, 1890-1905. *Japanese Studies in the History of Science* 5, 1, pp. 1-49.
- HOLTON, G. (1979): *Albert Einstein, Sein Einfluß auf Physik, Philosophie und Politik*. Braunschweig, P. C. Aichelburg y R. U. Sexl Eds., en W. Kuhn, *Das Wechselspiel von Theorie und Experiment im physikalischen Erkenntnisprozeß. DPG-Didaktik-Tagungsband. Scharmann*. Gießen: Univ. Gießen Verlag, Hofstätter und Kuhn Eds, 1983). En línea en: <http://www.ekkehard-friebe.de/Kuhn1983.htm>
- HOLTON, G. (1981). *Thematische Analyse der Wissenschaft. Die Physik Einsteins und seiner Zeit*. Frankfurt, Suhrkamp Verlag , en W. Kuhn, *Das Wechselspiel von Theorie und Experiment im physikalischen Erkenntnisprozeß. DPG-Didaktik-Tagungsband. Scharmann*. Gießen: Univ. Gießen Verlag, Hofstätter und Kuhn Eds, 1983). En línea en: <http://www.ekkehard-friebe.de/Kuhn1983.htm>
- HOLTON, G. (1982). Holton, G., (1982): *Ensayos sobre el pensamiento científico en la época de Einstein*. Madrid: Alianza Universidad.
- HOLTON, G. (1988). Einstein, Michelson, and the 'Crucial' Experiment. *Thematic Origins of Scientific Thought: Kepler to Einstein*. Harvard University Press.
- HURTADO DE MENDOZA, D, DREWES, A. (2004). Tradiciones y rupturas. La historia de la ciencia en la enseñanza. Buenos Aires: Jorge Baudino Ediciones y UNSAM, Escuela de Humanidades. Colección Cuadernos de Cátedra.
- KLEE, R. (1999). *The Undetermination of Theory. Scientific Inquiry: Readings in the Philosophy of Science* (Oxford University Press, New York, Cap. 4). En línea en: <http://www.drury.edu/ess/philsci/KleeCh4.html>
- KUHN, T. (1961). *Quantification: A History of the Meaning of Measurement in the Natural and Social Science*. Indianapolis, H. Woolf. Ed. En línea en: <http://www.ekkehard-friebe.de/Kuhn1983.htm>

- KUHN, T. (1962). *The structure of scientific revolutions*. Chicago: University of Chicago Press.
- KUHN, W. (1983). Das Wechselspiel von Theorie und Experiment im physikalischen Erkenntnisprozeß. DPG-Didaktik-Tagungsband. Scharmann, Hofstätter u. Kuhn (Eds.). Univ. Gießen Verlag. pp. 416-438
- LAKATOS, I. (1965). Falsification and the Methodology of Scientific Research Programmes. *Criticism and the Growth of Knowledge*. Proceedings of the International Colloquium in the Philosophy of Science 4, 132-135 Lakatos, I. & Musgrave, A. (eds.). New York: Cambridge University Press, 1997.
- MAXWELL, J.C. (1873). *A Treatise on Electricity and Magnetism*, (Oxford, 1873). P. Harman, 2001 *The Natural Philosophy of James Clerk Maxwell*. Cambridge: Cambridge University Press.
- .MICHELSON, A. y MORLEY, E. (1887). On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether. *The American Journal of Science*, Third Series, 34, 203, pp.333-345. New Haven, Connecticut, J. E. and E. S. Dana Eds.
- PAIS, A. (1983). *Subtle is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford. Oxford University Press, 1983. .
- POINCARÉ, H. (1905). *Science and Hypothesis*. Chapter 12: Optics and Electricity. London, Walter Scott Publishing. The Mead Project. Department of Sociology, Brock University, St. Catharine's. Ontario. I. Gordon Ward & R. Throop Eds., 2002, pp. 211-224. En línea en:
http://spartan.brocku.ca/~lward/Poincare/Poincare_1905_13.html
- RAMIREZ CASTRO, J.L., GIL PEREZ, D. y MARTINEZ TORREGROSA, J. (1994). *La resolución de problemas de Física y Química como investigación*. Madrid, Ministerio de Educación y Ciencia, Secretaría General Técnica.
- SOLBES, J., VILCHES, A. (1992). El modelo constructivista y las relaciones CTS. *Enseñanza de las Ciencias*, 10 (2), pp. 181-186.

ANEXO 1

Unidad didáctica: Cinemática (duración: 3 semanas, 2 módulos de 1 1/2 hora/ semana)

Nivel: 1° Polimodal (Economía y Gestión)

Desarrollo de la unidad didáctica

ETAPA 1 (Clase 1)

1.1 Test de ideas previas sobre movimiento, basado en 3 o 4 preguntas simples sobre hechos cotidianos con registro escrito, por ejemplo:

- a) Cuando vamos en auto por la ruta, parece que los árboles a nuestro lado se mueven, ¿porqué te parece que ocurre eso?
- b) Mirando el siguiente diagrama: ¿podrías dibujar la forma del movimiento de una pelota que es arrojada hacia arriba: a) por una persona ubicada cerca del Polo Sur (S) y b) por otra persona ubicada en el Polo Norte (N)?

1.2 Explicación básica de los fenómenos de movimiento, y discusión de leyes de velocidad, movimiento uniforme y uniformemente acelerado, ilustrada en el laboratorio o en el aula con la observación de sistemas simples (experimentos de velocidad de caída o deslizamiento por planos inclinados de objetos de diferentes formas y pesos).

1.3 Consigna para Clases 4/ 5: lectura sencilla sobre experimentos cinemáticos de Galileo (texto o hipertexto) y armado de dispositivos (rampas acanaladas) por equipos (2/3 alumnos) para estudiar leyes de movimiento simples.

ETAPA 2 (Clase 2)

2.1 Análisis por equipos de 2-3 alumnos de un texto divulgativo breve sobre la teoría cosmológica y la concepción del movimiento en Aristóteles y su evolución hasta el modelo newtoniano, con las consignas siguientes:

- Lean atentamente el texto y discutan entre ustedes su contenido ¿Encuentran algunos términos o expresiones usados en clase? Hagan una lista de las palabras que tengan que ver con la explicación de clase sobre movimiento.
- Expliquen dos o tres diferencias que encuentren entre las ideas de Aristóteles y la teoría de la Cinemática estudiada en clase
- Traten de relacionar las leyes de movimiento de Aristóteles (siglo IV a.C.) con las nociones de velocidad y velocidad media explicadas en clase, que corresponden a las leyes de Newton (siglo XVII). ¿Qué problemas encuentran y a qué los atribuyen?

ETAPA 3 (Clase 3)

3.1. Evaluación de proceso (por equipos de 2 alumnos):

Problema 1:

Describan dos hechos cotidianos que les permitan comprobar algún error en la teoría del movimiento de Aristóteles, y expliquen sus razonamientos con el mayor detalle posible.

Problema 2:

La Torre de Pisa, ubicada en la ciudad italiana del mismo nombre, desde la cual se supone que Galileo pudo haber hecho su famoso experimento de caída libre, tiene 56 metros de altura. Suponiendo que en la época de Galileo su inclinación fuera de 15 grados, y usando las fórmulas que consideren adecuadas para este movimiento, calculen cuánto tiempo tardaría en llegar al suelo un objeto que se deja caer desde lo alto de la misma.

ETAPA 4 (Clases 4 y 5)

4.1 Experimentos de medición de tiempos, longitudes recorridas y velocidades de pelotitas a lo largo de las rampas armadas por cada uno de los equipos según las consignas de Clase 1, utilizando los instrumentos (relojes o cronómetros; reglas o metros) aportados en cada caso. Los resultados de 5 mediciones de cada equipo se registran una junto a otra como columnas (espacio e / cm y tiempo t / s) en pizarra y en la carpeta de clase.

4.2 Espacio de debate, sobre preguntas disparadoras, por ejemplo: a. ¿por qué los valores medidos por cada equipo son diferentes entre sí (noción cualitativa de error)? b. ¿cómo podemos determinar qué tipo de movimiento hacen las pelotitas? c. ¿qué información podemos sacar a partir de la representación gráfica de los datos de distancia recorrida vs. tiempo?

ETAPA 5 (Clase 6)

5.1 Evaluación final individual (sumativa y formativa)

A partir de la siguiente reproducción de un manuscrito de Galileo (Baig y Agustench, 1996: 113), que representa sus mediciones de las distancias recorridas por una esfera en caída libre, y de la tabla que resume dichos datos experimentales (espacio en cm vs. tiempo en segundos), hacer una representación gráfica adecuada para deducir de que tipo de movimiento se trata (MRU, MRUA u otro).

SUMMARY

The concept of crucial experiment is critically revised, on the basis of an historic discussion of the interferometric experiments of Michelson and Morley (1881-87), replied and refined by a couple of physicists in the next decades, on the hypothesis of existence of a material medium or ether for light waves propagation, and developed in an attempt for saving the fitting between the Maxwell's formalism of Electrodynamics and Newtonian Mechanics, via the postulation of an absolute inertial frame.

The analysis of the historic context of development of physical theories between 1881 and 1930 show evidences about the insufficiency of the epistemic category of crucial experiment, in connection with rigid logicians interpretations, and rational reconstructions of the change of theories in Physics, in the sense of M. Bunge.

The discussion is based on two argumentative ways, respectively the characterisation of the ether notion in the preexistent physical theories by the time of the first Michelson's interferometric measurements as an ad hoc theoretical concept -preserved in the (non relativistic) Maxwell's formulation of the Electrodynamics (1873) because of the necessity of fitting to postulations of Newtonian Physics- and the analysis of the virtual irrelevancy of the interferometric experiments of Michelson and Morley (1881-87) for the construction of Relativity Theory by Albert Einstein, and consequently for the change of theories/ paradigms between classical Mechanics and Special Theory of Relativity (STR).

Some implications of our conclusions are briefly discussed, concerning with science teaching situations and reformulation of Physics curriculum contents in STS (Science, Technology and Society) in Polimodal level (15/17 years) in Argentina.

Key words: *Crucial experiment; Michelson; Physics; Teaching; Polimodal; STS.*