

UN TEST ASTRONÓMICO PARA EL SEGUNDO POSTULADO DE LA TEORÍA ESPECIAL DE LA RELATIVIDAD

Juan J. Schulz Poquet

Sahumar S.R.L.

Saavedra 654 1708 MORON – Buenos Aires Telefax (5411) 4483 0152

e-mail jjschulzpoquet@hotmail.com

Se hace un análisis conceptual y crítico de la Teoría Especial de la Relatividad, fundamentalmente de su 2º postulado, enumerando las razones que todavía justifican la realización de un test para poner a prueba su validez. Se hacen citas textuales del propio Einstein y de conocidos científicos y profesores de Física, las que abonan y alientan la posición del autor, especialmente las del Prof. J. G. Fox de sus papers “Experimental Evidence for the Second Postulate of Special Relativity” y “Evidence Against Emission Theories”, publicados ambos en la década 1960 en el American Journal of Physics. Se dan los lineamientos de una teoría cuyo desarrollo podría explicar adecuadamente los fenómenos explicados hoy día por la Relatividad. Finalmente, se propone un método astronómico, basado en observaciones sistemáticas del fenómeno de la aberración estelar, para testear en forma directa el postulado referido. Se concluye que, considerando la importancia del tema, cualquiera fuere el resultado obtenido, se justifica el test propuesto.

A conceptual and critical analysis of the Special Relativity Theory is made, mainly on its 2nd postulate, enumerating the reasons that still justify making a test to proof its validity. Textual Albert Einstein’s quotations are used, as well as others belonging to renowned scientists and Physics professors, all of them enhancing the author’s position, especially those in Prof. J.G. Fox papers “Experimental Evidence for the Second Postulate of Special Relativity” and “Evidence Against Emission Theories”, both published during the 1960 decade in the American Journal of Physics. The lineaments of a theory which development could explain adequately the phenomena explained at present by relativity are given. Finally, an astronomical method is proposed, based on systematic observations of the stellar aberration phenomenon, in order to test in a direct way the referred postulate. It is concluded that, considering the importance of the subject, whatever the result obtained, the proposed test is justified.

I. INTRODUCCIÓN

A casi un siglo de su postulación, las fórmulas derivadas de la Teoría de la Relatividad (TR) han ido demostrando su eficacia en el cálculo de las magnitudes intervinientes en los fenómenos dinámicos de altas velocidades. Los resultados experimentales han concordado tan bien con los previstos por estas fórmulas que puede parecer extemporáneo y hasta ridículo plantear la conveniencia de un nuevo test para esta famosa teoría. Pero no creo equivocarme al afirmar que esta concordancia es la única razón de su aceptación generalizada, y que aún persiste en muchos científicos la esperanza de que algún día se realice un experimento que deje sin dudas la validez de su segundo postulado.

Que esto sea cierto se deberá seguramente a las razones que enumero a continuación, y que seguidamente desarrollaré:

- 1) El postulado básico de la TR es intrínsecamente ilógico.
- 2) Los hechos empíricos que lo avalaron en la época de su postulación son hoy día cuestionables.
- 3) No existe a la fecha una prueba experimental directa incuestionable.
- 4) Es posible desarrollar una teoría sobre bases más lógicas que conduzca a fórmulas similares a las deducidas de la TR.

1) **El postulado básico de la TR es intrínsecamente ilógico:** Decir que la velocidad de la luz, para un determinado sistema inercial de referencia, es independiente del movimiento de la fuente luminosa, como reza el 2º postulado, lleva inmediatamente a la idea de un medio solidario al sistema de referencia en el cual la luz se propaga con su velocidad característica en ese medio, c . Pero el 1º postulado nos advierte que las leyes físicas son válidas para todos los sistemas inerciales, y, por lo tanto, exige que esta velocidad sea la misma para cualquier otro sistema inercial, es decir, que ese valor c se tiene que dar tanto para el caso del movimiento de la fuente como para el del observador. O sea, que esta constancia debe ser válida para cualquier movimiento *relativo* entre fuente luminosa y observador.

Esta constancia de c , corazón de la TR, o su *postulado básico*, da lugar a las llamadas “transformaciones de Lorentz”, que relacionan los distintos parámetros a medir desde dos sistemas inerciales K y K' con velocidad uniforme v entre sí, y aparece seguramente ilógica para más de un estudiante de ciencias que aborde la TR por primera vez; como un escollo molesto y perturbador en el mar de la lógica y el sentido común por el que venía navegando en su estudio de la ciencia en general o, más específicamente, de la llamada Física Clásica. Aceptar esta conclusión, o, mejor dicho, esta imposición, nos lleva a imaginar un

medio lumínico capaz de adaptarse al movimiento relativo entre una fuente luminosa y su observador, de modo tal que cualquiera sea el sentido y el valor de este movimiento, la velocidad de la luz que mida el observador sea siempre la misma. O que la fuente misma se adapta a distintos observadores con distintos movimientos relativos, emitiendo luz de un modo tal que cada uno de ellos la registre con la misma velocidad de llegada. Cualquiera sea el mecanismo que uno imagine para este proceso, no es posible encuadrarlo en los patrones naturales o lógicos.

Y así como es ilógica la constancia de c , resulta discutible la concepción de simultaneidad y sincronismo que Einstein hace para el desarrollo de sus fórmulas. La simultaneidad de dos o más acontecimientos debe ser una definición, como lo es la ubicación de un determinado punto en el espacio, no debiendo depender del método empleado para constatarla. En la TR se la define por la coincidencia observada de las señales emitidas por los acontecimientos, apelándose a la luz por ser la señal más rápida disponible. Cuando anotamos, por ejemplo, el comienzo de una erupción en la superficie solar en un registro astronómico, sabemos que en realidad ya ocurrió aproximadamente 8,3 minutos antes, y decimos *aproximadamente* porque no conocemos los valores exactos ni de la velocidad de la luz ni de la distancia del sol. De modo que en acontecimientos lejanos la simultaneidad sólo puede darse por definición o deducirse por inferencia. Esto vale igualmente para el establecimiento del valor de cualquier parámetro ponderable: lo conocemos realmente en proporción a la calidad del instrumento utilizado para medirlo. En la TR, cuando el parámetro a medir es el tiempo, nos encontramos con las famosas paradojas de los relojes, tan difíciles de “digerir”, y que tuvieron severos cuestionamientos, como, por ejemplo, el de Dingle¹.

2) Los hechos empíricos que lo avalaron en la época de su postulación son hoy día cuestionables:

En su clásico trabajo “Sobre la Electrodinámica de los Cuerpos en Movimiento” (Annalen der Physik **17**, 891–1905), en la parte 1 de su Introducción, Einstein dice:

“Es bien conocido que si intentamos aplicar la electrodinámica de Maxwell, como se la concibe al presente, a cuerpos en movimiento, llegamos a asimetrías que no están de acuerdo con los fenómenos observados...” Luego continúa en la parte 2: “Ejemplos de similar categoría tales como los fracasados intentos de sustanciar el movimiento de la Tierra en relación al ‘medio lumínico’ nos conducen a la suposición de que no sólo en mecánica, sino también en electrodinámica, ninguna propiedad de los hechos observados corresponde al concepto de reposo absoluto;...”²

Vemos que en su trabajo original de 1905, Einstein hace solamente una oblicua mención al considerado por muchos como la prueba crucial para la TR, me refiero al experimento de Michelson-Morley.³ ¿Se estaría refiriendo en realidad solamente a la prueba de Airy en la que éste llenó con agua el telescopio del Observatorio de Greenwich, con lo que esperaba obtener un ángulo de aberración estelar mayor, bajo el concepto de éter con el que se estaba explicando por

entonces el famoso fenómeno descubierto por Bradley? Es muy probable que así fuera si atendemos a lo confesado por el propio Einstein a R. S. Shankland en una entrevista de éste en febrero de 1950. Cito textualmente*:

“Cuando le pregunté cómo se había enterado del experimento de Michelson-Morley, él me dijo que supo del mismo por los escritos de H. A. Lorentz,¹ pero que solamente después de 1905 había llegado a su atención. ‘De otra manera’, me dijo, ‘lo habría mencionado en mi paper’^{II}. El continuó diciendo que los resultados experimentales que más lo habían influido fueron las observaciones sobre la aberración estelar^{III}, y las mediciones de la velocidad de la luz en el agua en movimiento, de Fizeau^{IV}. ‘Eso fue suficiente’ dijo.”⁴ (las notas I, II, III y IV son de R. S. Shankland).

El autor del artículo citado destaca este hecho reproduciendo los comentarios de su colega, el profesor L. L. Foldy, a continuación de la nota II, cuyos últimos párrafos cito textualmente*: “Todo el paper es bastante extraño en el sentido de que Einstein revela muy poco sobre lo que él conoce como experimentalmente verificado, y de que él no hace específicas referencias al trabajo de otros. El paper en efecto presenta un enigma en el que es muy difícil ver cuánto de la teoría especial de la relatividad es una pura construcción mental y cuánto una inferencia de resultados experimentales (o una formulación teórica de ellos) de los cuales Einstein tenía conocimiento. Ver también G. Holton, Am. J. Phys. **28**, 627 (1960).”

Veamos qué dice Einstein al respecto, en una conferencia pronunciada en Londres en 1921:

“...Considerando que voy a explicar la teoría de la relatividad, debo señalar que esta teoría no tiene un origen especulativo. Su descubrimiento se debe al intento de adaptar lo mejor posible la teoría física a los hechos observados... La ley de la constancia de la luz en el vacío, corroborada por el desarrollo de la electrodinámica y de la óptica, unida al conocido experimento de Michelson para explicar la equivalencia de todos los sistemas inerciales (principio de relatividad restringida), condujo en primer lugar a que se tuviera que relativizar el concepto de tiempo...”⁵

Veamos también una referencia más taxativa de este tema en las palabras del autor de la TR en su libro “El Significado de la Relatividad”, cuando dice textualmente en el capítulo La Teoría de la Relatividad Especial:

“...Pero todas las experiencias han demostrado que los fenómenos ópticos y electromagnéticos, respecto de la Tierra como cuerpo de referencia, no son influidos por la velocidad de traslación de dicho cuerpo. Las más importantes de todas esas experiencias son las

* Traducción al Español del autor del presente artículo.

^I H. A. Lorentz, Arch. Néerl. **2**, 168 (1887).

^{II} A. Einstein, Ann. Physik **17**, 891 (1905).

^{III} J. Bradley, Phil. Trans. Roy. Soc. (London) **35**, 637 (1728); G. B. Airy, Proc. Roy. Soc. (London) **20**, 35 (1871); **21**, 121 (1873).

^{IV} H. L. Fizeau, Compt. rend. **33**, 349 (1851); Ann. Chem. Phys. **57**, 385 (1859).

de Michelson y Morley que supongo conocidas por el lector. En consecuencia, resulta poco consistente cualquier duda respecto del principio de relatividad especial.

Por otra parte, se ha demostrado la aplicabilidad de las ecuaciones de Maxwell y Lorentz a los problemas ópticos que presentan los cuerpos en movimiento. Ninguna otra teoría ha explicado de un modo satisfactorio los fenómenos de aberración, la propagación de la luz en los cuerpos en movimiento (Fizeau) y los fenómenos observados en las estrellas dobles (De Sitter). Puede considerarse, pues, como demostrada la consecuencia de las ecuaciones de Maxwell y Lorentz que afirma que en un espacio vacío la luz se propaga con la velocidad c , al menos respecto de un sistema inercial definido, K . De acuerdo con el principio de la relatividad especial debemos también admitir la validez de esa consecuencia para cualquier otro sistema inercial.”⁶

Así que, independientemente de que en su trabajo original no lo hiciera, tenemos aquí mencionados en detalle los hechos experimentales que, según Einstein, fundamentan su postulado de la constancia de c , a saber:

- A) El experimento de Michelson-Morley³
- B) El fenómeno de la aberración estelar^{7,8}
- C) El experimento de Fizeau sobre la velocidad de la luz en agua en movimiento⁹
- D) La argumentación de De Sitter sobre los fenómenos observados o, mejor dicho, no observados con las órbitas aparentes de las estrellas dobles¹⁰.

Veamos ahora, caso por caso, cómo los discutimos, justificando el título de este ítem 2):

A) Este es el caso más sorprendente, el que no puedo entender cómo se lo mantiene conceptuado como “experimento crucial” que desencadenó la TR. Veamos mis razones:

a) La fuente luminosa y el observador estaban en el mismo sistema de referencia (la Tierra), no existiendo, por lo tanto, ningún movimiento relativo entre ambos. El experimento con bases válidas, en todo caso, fue el de Tomaschek, realizado mucho después, tomando una estrella como fuente luminosa¹¹. En el ítem 3) veremos cómo también hoy día está desvirtuada la validez de este experimento.

b) El experimento original (ya que fue repetido innumerables veces a posteriori) fue realizado en un ambiente con aire, no en el vacío, como se refiere en el 2º postulado a la constancia de c .

c) La conclusión más inmediata y natural del resultado de este experimento es que la luz acompaña el movimiento de la fuente, al menos en un medio con aire. (Cabe acotar que el planteo de este experimento es similar, en definitiva, al de Fizeau, realizado con anterioridad, ya que se intentaba ver cómo influía el movimiento respecto del éter en el de la luz. La diferencia es que en lugar de agua se usó el supuesto éter, y que en lugar de hacer circular agua en el sistema fuente-observador fijo, se hizo “circular” a fuente y observador en el supuesto éter fijo.

B) La aberración estelar es tratada en un capítulo aparte, como introducción al test propuesto, *leitmotiv* del presente trabajo. Digamos aquí que solamente en la prueba de Airy pudo ser tomada como un hecho experimental en apoyo de la TR, al no mostrar ninguna variación en su valor, tanto con el telescopio vacío como lleno con agua. De todos modos, como veremos, es el hecho más llamativo en contra de la TR, al evidenciar el movimiento terrestre por su composición con el de la luz proveniente de una fuente exterior a la Tierra.

C) El experimento de Fizeau trata de cómo interfiere un medio material en movimiento (el agua en este caso) con la velocidad de la luz, y no es una prueba directa del 2º postulado sino de una de sus consecuencias, en todo caso, como es el Teorema de Adición de Velocidades en la TR; es decir, uno de los casos en que las fórmulas derivadas de la TR son verificadas experimentalmente. Destaquemos que en dicho experimento también permanecen en el mismo sistema de referencia, como vimos en el punto A), la fuente luminosa y el observador. Curiosamente, o paradójicamente, como ocurre con el caso del punto anterior, el hecho que el movimiento del agua produzca un corrimiento en las franjas de interferencia en el interferómetro (cualitativamente hablando) contradice el 2º postulado, bajo la teoría electromagnética de la dispersión de la luz; esto es así porque, bajo esta teoría, los electrones del agua pasan a ser fuentes de reemisión luminosa, y sólo producen corrimiento en las franjas cuando el agua está en movimiento, o sea, cuando la fuente se mueve respecto del observador.

D) Esta argumentación es posterior al enunciado de la TR, por lo que Einstein no contaba con ella en ese entonces. Es tratada extensamente por Fox en sus trabajos que mencionaremos en el ítem 3). Digamos aquí solamente que para el caso de binarias cercanas, en las que se dan velocidades radiales de significación como para presentarse la paradoja de que una componente aparezca simultáneamente en dos lugares distintos de su órbita, si efectivamente se adicionara la velocidad de la luz emitida a la propia de la componente, O. Struve ha mostrado que hay evidencia en los sistemas estelares con componentes cercanos de la existencia de una cobertura gaseosa que encierra todo el sistema¹². Esta cubierta tendría un espesor suficiente como para *extinguir* las velocidades originales de la luz de sus componentes. En los casos de las binarias visuales, de componentes muy separadas, el efecto de la adición de velocidades sería de deformaciones o excentricidades en las órbitas aparentes. Estas excentricidades se observan, pero no sabemos si son reales o si se deben al efecto mencionado. Vale la pena citar a Fox en su conclusión sobre este tema*:

“... De modo que no puede argumentarse que los registros sobre estrellas dobles provean soporte para la teoría emisiva. Sin embargo, parece, contrariamente a lo que se ha creído por décadas, que los registros sobre estrellas dobles no ofrecen ninguna evidencia en contra de la teoría emisiva.”¹³

De este breve análisis de los hechos que fueron tomados como conducentes al enunciado de la TR, cabe preguntarse cómo pudo enunciarse y, después, aceptarse, esta teoría. Mi opinión es que el mundo científico de la época estaba imbuido, incluyendo al propio Einstein, con la idea de un medio en reposo absoluto, cuya vibración transmitía las ondas electromagnéticas en general, la luz en particular, es decir, el famoso éter. Los tres primeros casos atentaron fuertemente contra esta idea, quedando solamente el cuarto para apoyarla, si bien fue algo posterior. El desconcierto producido en los sostenedores de la idea del éter (todo el mundo, en realidad) fue enorme, y varias hipótesis fueron lanzadas para explicarlos, como las de la contracción de las longitudes, de Lorentz y Fitzgerald, y las del arrastre del éter, de Fresnel. Y en este contexto Einstein lanzó la suya, de la constancia de c , con toda la elaboración ad-hoc de la TR. Estas explicaciones mantienen la idea de un éter absoluto, al igual que la teoría electrónica y ecuaciones de Maxwell y Lorentz, y la misma TR implica el éter lumínico, sólo que con el aditamento de su versatilidad para mantener c constante a cualquier observador, independientemente de su movimiento relativo respecto de la fuente luminosa. Y esto a pesar de expresar Einstein en el desarrollo de su teoría, y a posteriori, que la idea del éter debía desecharse por carecer de sustento experimental.

¿Cómo no se tomó como explicación de los resultados negativos mencionados la posibilidad de que la luz incorpore la velocidad de la fuente a la suya propia? ¿Había acaso algún hecho experimental, aparte de la argumentación de De Sitter, para rechazar esta idea? Aparece como única respuesta el arraigo a la idea del éter. Por supuesto, la otra respuesta es que el genio de Einstein vislumbró o concibió la explicación de la constancia de c , más allá de la validez o no de los hechos experimentales de la época.

3) **No existe a la fecha una prueba experimental directa incuestionable:** No teniendo ninguna noticia de que en los últimos 40 años se haya realizado algún experimento concluyente en este sentido, me voy a referir aquí directamente al trabajo de J. G. Fox "Experimental Evidence for the Second Postulate of Special Relativity"¹⁴. De este trabajo transcribo textualmente* el resumen inicial:

"Es señalado que el teorema de extinción de la teoría de dispersión, del cual se da una derivación elemental, muestra que una onda de luz incidente es extinguida en la superficie de un dieléctrico. Esto puede significar que información sobre la velocidad de la luz proveniente de una fuente en movimiento podría perderse si la luz pasara a través de un material estacionario transparente antes de ser medida. Todas las mediciones de laboratorio del pasado, realizadas para verificar la constancia de la velocidad de la luz, sobre fuentes y espejos móviles, y sobre fuentes extraterrestres, fueron hechas solamente después que la luz hubiera pasado a través de un material estacionario. Las estrellas dobles, especialmente los pares binarios cercanos, están rodeadas por una envoltura gaseosa común que puede contener materia suficiente como

para extinguir la luz directa proveniente de las estrellas. De este modo, la prueba de la constancia de la velocidad de la luz de De Sitter puede no ser concluyente. Se concluye que puede no existir ninguna evidencia experimental segura para el segundo postulado de la relatividad especial."

El mismo J. G. Fox analiza poco tiempo después cómo se pueden interpretar distintos resultados experimentales de varios fenómenos ópticos y electrónicos bajo el punto de vista de la teoría emisiva de Ritz¹⁵ teniendo en cuenta el teorema de extinción, llegando a la conclusión que no hay hechos experimentales concluyentes, tanto para aceptar la teoría como para rechazarla. Dada la posición de la teoría de Ritz tan contraria a la TR respecto de la velocidad de la luz, esta conclusión es válida también para su segundo postulado. Considero también adecuada la transcripción textual* del resumen inicial del trabajo de Fox titulado "Evidence Against Emission Theories"¹³:

"La teoría de electromagnetismo y óptica de Ritz es criticada en relación a la evidencia experimental luego de la introducción de una simple y natural modificación de la hipótesis concerniente a la velocidad de la radiación dispersada por los electrones de un medio. Se argumenta que la teoría entonces está en armonía con la teoría electrónica de la dispersión, rinde satisfactoriamente con la aberración, el efecto Doppler de primer orden de fuentes móviles y experimentos interferométricos sobre estrellas binarias. No hay evidencia proveniente de estrellas binarias que la contradiga. Es compatible con el efecto Doppler de segundo orden y posiblemente con el experimento de Fizeau desde que hay avanzados argumentos que indican que estos fenómenos dependen esencialmente del momento y de la energía de radiación. Se discuten otros fenómenos. Se concluye que la mejor evidencia en contra de la teoría proviene de experimentos sobre el tiempo de vida de mesones rápidos y de la velocidad de rayos γ y luz de fuentes en movimiento. Las justificaciones de la discusión son el deseo de tener una base experimental de una importante parte de la física tan rigurosa como sea posible, y la esperanza de que agudice nuestro entendimiento sobre la existencia de evidencia para la relatividad especial, y estimule nuevos y diferentes experimentos."

4) **Es posible desarrollar una teoría sobre bases más lógicas que conduzca a fórmulas similares a las deducidas de la TR:** En la primera sección del paper de Fox "Evidence Against Emission Theories"¹³ se ofrece un resumen de la teoría electromagnética de Ritz¹⁵, en el que se la considera como el único intento serio de una teoría emisiva, es decir, que considere a la propagación de las ondas electromagnéticas vinculadas al movimiento de la fuente emisora. Esta teoría fue en realidad solamente esbozada como un ejemplo de cómo podía oponerse al concepto de la invariancia de la teoría electromagnética de Maxwell-Lorentz sobre bases relativistas en el sentido galileano. Lamentablemente nunca pudo llevarla a una expresión más ajustada y que incluyera los fenómenos ópticos, por fallecer

prematuramente, al año y medio de su primer enunciado.

Sin hacer consideraciones acerca de la naturaleza o constitución de los campos de fuerzas, y sin pretender contener el modelo emisor de Ritz, aunque tal vez lo esté haciendo, se podría acudir a los siguientes lineamientos para el desarrollo de una teoría, que podríamos llamar “de los campos móviles”:

I) Toda partícula material produce en el espacio que la rodea uno o más campos de fuerzas, que se propaga o propagan con una velocidad característica del campo originado y del medio por el que se propaga.

II) El campo producido depende de la naturaleza de la partícula, y se pone de manifiesto por la fuerza actuante sobre otra partícula material. Esta fuerza dependerá de:

- 1) La naturaleza de la segunda partícula
- 2) La velocidad relativa de ésta respecto de la del campo.

III) El campo acompaña siempre el movimiento de la partícula que lo produce, en forma total en el vacío, y en forma proporcional o nula en un medio material, según la permeabilidad del medio.

IV) Todos los enunciados anteriores son válidos en todos los sistemas inerciales, es decir, no existe ningún sistema privilegiado para ellos.

Estos enunciados no pretenden ser exhaustivos sino constituir los lineamientos de una teoría que pueda explicar los fenómenos electromagnéticos y dinámicos en general, contraponiéndola a la TR. (Nótese, no obstante, que el último es similar a su primer postulado). Para hacerlo en forma cuantitativa necesita el desarrollo matemático y experimental para cada campo en particular, que pueda arrojar las expresiones matemáticas de las relaciones de los distintos parámetros. Seguramente estas expresiones, o fórmulas, contendrán coeficientes de la forma β^n , donde β es la velocidad relativa entre las de la partícula y la del campo (v y c , expresada como $c \pm v$ ó v/c , etc.), y n , un número entero o fraccionario, positivo, nulo o negativo, según el caso. Como un ejemplo de sus consecuencias, digamos que la fuerza que un campo eléctrico ejerce sobre una partícula en movimiento cargada eléctricamente, iría disminuyendo en la medida que ésta aumente su velocidad, si se mueve en el sentido de propagación del campo, por disminuir la velocidad relativa entre partícula y campo. Lo mismo ocurriría con la masa de una partícula moviéndose en el mismo sentido de la propagación del campo gravitatorio correspondiente. En ambos casos vale la consideración contraria, de aumento de sus valores, si el movimiento de la partícula es contrario a la propagación del campo.

Pero este análisis tendrá sentido si tiene sentido hablar de velocidad *relativa* de una partícula respecto de un campo de fuerzas, ya que si solamente existe c para esta velocidad, la TR es valedera, y sus fórmulas son las aplicables.

Habiendo expuesto las razones que, a mi entender, justifican el esfuerzo de encarar un nuevo test para la TR, paso a su descripción, haciendo

previamente un repaso del fenómeno en que está basado.

II. LA ABERRACIÓN ESTELAR

El fenómeno de la Aberración Estelar, observado y explicado por Bradley⁷, el que fuera considerado como la primera evidencia concreta del movimiento terrestre alrededor del Sol, dando así un espaldarazo definitivo a la teoría copernicana heliocentrista, tal vez sirva hoy día para confirmar el 2º postulado de la TR, o, por el contrario, para rechazarlo, también en una manera decisiva. Su medición brindó asimismo un método para el cálculo de la velocidad de la luz, confirmando el valor hallado previamente por Römer, fruto también de mediciones astronómicas, en aquel caso, como sabemos, de los retrasos en los eclipses de un satélite de Júpiter.

Todos conocemos la figura utilizada en los libros de texto para una fácil comprensión de este fenómeno: la de la lluvia y un peatón con paraguas, y de cómo éste tendrá que inclinar más el paraguas en la medida que camine más rápidamente, aún en ausencia de viento y la consecuente caída vertical de la lluvia.

¿Y cómo se produce la aberración? En la correcta conceptualización de este fenómeno reside la clave para poder juzgar la validez del 2º postulado. A Bradley no le preocupó mucho la naturaleza de la luz para describirlo, aunque parece que adhería a la teoría corpuscular de Newton¹⁶. Si bien él no lo dejó escrito, está aceptado que se le ocurrió su explicación (estaba en realidad investigando las paralajes estelares cuando lo descubrió) en un paseo en yate por el Támesis, durante el cual observó cómo variaba la posición de la veleta de la embarcación según la velocidad de ésta y la del viento^{17,18}. Asimiló entonces la luz de las estrellas al viento, y la Tierra al yate, y razonó que, así como la veleta apuntaba a la dirección resultante del viento, el telescopio debía apuntar a la dirección resultante de la luz.

Que la luz tenga una dirección resultante distinta al componer su movimiento con el de la Tierra, habla de por sí que se ha adicionado vectorialmente. Entonces **no se ha mantenido constante** al ser observada la fuente luminosa (la estrella) desde la Tierra, en movimiento respecto de ella. Este hecho constituiría de por sí una prueba de la invalidez del 2º postulado. Pero repasemos en detalle los aspectos geométricos de este fenómeno, bajo este concepto:

En la Figura 1, S es la posición real de una estrella, T, la de la Tierra, y los vectores \vec{v} y \vec{c} representan las velocidades de la Tierra y de la luz proveniente de la estrella, respectivamente. Volviendo mentalmente al cuadro de la lluvia y el peatón con

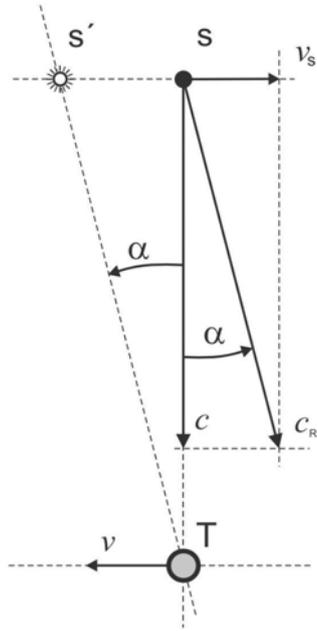


Figura 1: La aberración α como composición vectorial de las velocidades v_s (aparente de la estrella S) y c (de la luz de la estrella S).

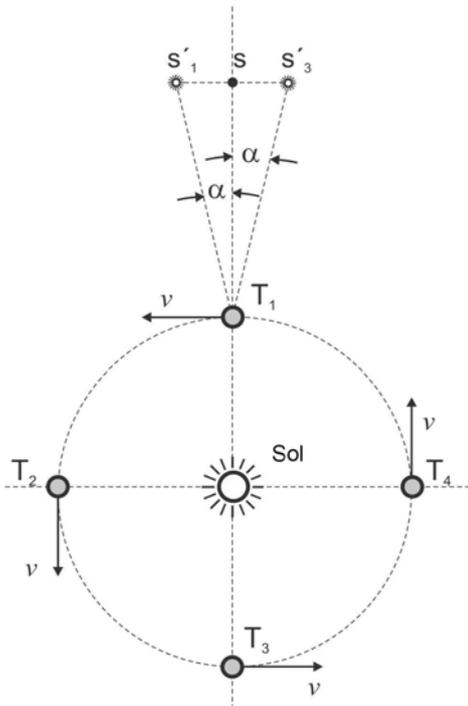


Figura 2: Posiciones de la Tierra cada tres meses, y de una estrella S en el plano de la eclíptica.

paraguas, \vec{v} correspondería a la velocidad del peatón, y \vec{c} , a la de la lluvia, que cae verticalmente porque no hay viento, y las nubes están quietas respecto del piso. En la Figura 1 estamos simplificando y, aparte de no respetar la escala de sus valores, elegimos la posición de S de modo que resulte el desplazamiento de T perpendicular a la dirección de S ($\vec{v} \perp \vec{c}$). Si trasladamos \vec{v} a S en la dirección opuesta a la del

movimiento de la Tierra, tendremos el movimiento aparente de S, (\vec{v}_s), tal como sería el de las nubes para nuestro peatón. Los vectores \vec{c} y \vec{v}_s se componen (suma vectorial) para dar \vec{c}_R . Como sabemos, un telescopio en la Tierra que quiera enfocar la estrella S, deberá hacerlo en la dirección TS', paralela a \vec{c}_R , que forma un ángulo α respecto de TS, siendo α el ángulo de aberración, y S' la posición aparente resultante de la estrella en cuestión.

El caso de la Figura 1 corresponde a la situación de T₁ que se muestra en la Figura 2, en la que la estrella S se encuentra en el plano de la eclíptica, y la Tierra, alineada con el Sol y la estrella. En el transcurso del año, la posición de S' irá oscilando a lo largo de una recta, siendo la amplitud máxima de esta oscilación, S'₁S'₃ = 2 α , correspondiente a la diferencia de posiciones para las observaciones desde T₁ y T₃, medidas con 6 meses de diferencia. De T₁ a T₂, y de T₃ a T₄, la aberración irá disminuyendo hasta anularse totalmente en las posiciones T₂ y T₄, para las que el vector \vec{c}_R coincide con el \vec{c} . Aquí su módulo valdrá $|\vec{c}_R| = c - v$ ó $c + v$, pudiendo verificarse experimentalmente esta diferencia de valores con el efecto Doppler.

¿Es lógico suponer, como exige la TR para este caso, que en una suma vectorial de dos vectores, el módulo del vector resultante mantenga el valor del de uno de ellos si bien su dirección sí varió respecto de la de éste? ¿Qué paralelogramo deberíamos construir para que, en la Figura 1, \vec{c}_R fuera igual a \vec{c} , sin ser nulo \vec{v}_s ? Esto equivaldría a decir que en el triángulo TS'S, en la misma figura, la hipotenusa TS' es igual al cateto TS a pesar de que S'S no es nulo. Si bien $|\vec{c}_R| = \sqrt{(c^2 + v^2)}$ no se ha podido aún medir en forma valedera (por las dificultades expresadas en el ítem 3) de la Introducción), Bradley midió el valor de α , y cualquier astrónomo puede hacerlo hoy día. Y si α es una realidad, no hay geometría que no haga realidad que $|\vec{c}_R| = \sqrt{(c^2 + v^2)}$ sea mayor que c . (Cuando decimos que $|\vec{c}_R| = c_R$ no se ha podido aún medir, nos referimos al uso de un método distinto que el del efecto Doppler, el cual, como sabemos, revela la variación de frecuencias, explicada tanto bajo el concepto relativista como el clásico).

El caso descrito es un extremo. El otro extremo es para una estrella visualmente cercana a cualquiera de los polos de la bóveda celeste. Aquí, S' irá describiendo una circunferencia de radio α alrededor de S, es decir, siempre tendremos el mismo valor de la aberración, pero su dirección irá cambiando. La máxima diferencia en las posiciones aparentes se dará en un periodo de 6 meses, cualquiera sea la época elegida para las observaciones. Obviamente, para cualquier otra posición del astro elegido, éste irá describiendo una

elipse respecto de su posición real, cuyo semieje mayor será α , y el menor, $\alpha \cdot \sin \phi$, siendo ϕ la declinación del astro respecto de la eclíptica.

¿Y dónde se produce la composición de velocidades descrita? Si tenemos en cuenta la teoría electrónica de la dispersión o reemisión luminosa, esta composición se producirá en el primer contacto de la luz estelar con las capas superiores de la atmósfera, donde haya suficiente materia para extinguir la velocidad de esta luz, de acuerdo con el Teorema de la Longitud de Extinción^{19,20}. Esto también supone que a partir de esta composición la luz mantendrá su dirección, así como el valor normal de su velocidad para el aire. En el caso de no haber atmósfera (telescopio satelital Hubble, por ejemplo), el punto de inflexión se encontrará en el objetivo, por la misma razón de la extinción y reemisión de onda, actuando la estrella como una fuente luminosa fija en el objetivo. Esto explica el fracaso de la prueba de Airy, en 1871, cuando llenó de agua el telescopio del Observatorio de Greenwich, esperando obtener un valor mayor para la aberración, al propagarse la luz con una velocidad menor en el interior del telescopio. La idea de esta prueba es una consecuencia de la explicación que se daba por entonces a la aberración, imbuido como estaba por entonces el mundo científico con la idea del éter absoluto: en el tiempo transcurrido entre el pasaje de la luz por el objetivo y el ocular, la Tierra se desplaza un cierto valor que le hace perder el enfoque al ocular. Este desplazamiento se irá dando a lo largo del telescopio, resultando la trayectoria del rayo luminoso con una inclinación mayor que la que tendría de estar la Tierra, y por ende, el telescopio, en reposo. Si la luz se desplaza más lentamente –lo que efectivamente ocurre en el agua– la aberración será consecuentemente mayor. Pero esto no ocurrió, lo que prueba que el razonamiento con el éter era equivocado o, mejor dicho, la idea de un éter estacionario era equivocada. Por si quedaban dudas, poco tiempo después, en la década de 1880, los experimentos realizados por Michelson y Morley con su interferómetro giratorio, sellaron definitivamente esta idea. (En realidad no fue tan así, y todavía en nuestros días aparece de vez en cuando un intento de explicación del fracaso del experimento de M-M, con la intención de salvar la idea del éter^{21,22}).

Por otra parte, como sabemos, la TR explica la aberración por una simple aplicación de las transformaciones de Lorentz al ángulo formado por la dirección del movimiento de la Tierra con la visual de un cuerpo celeste, desde este último. Los sistemas K y K' son, entonces, el del astro y el de la Tierra, que se desplazan entre sí con la velocidad v de esta última. Si θ es el ángulo mencionado para el sistema K del astro, θ' será el correspondiente para el K' de la Tierra, y la aberración será la diferencia de ambos ángulos: $\alpha = \theta' - \theta$. La relación entre estos ángulos, aplicando las transformaciones de Lorentz, está dada por la expresión

$$\operatorname{tg} \theta' = \operatorname{tg} \theta \cdot (1 - \beta^2)^{1/2} / 1 - \beta \sec \theta$$

Despreciando los infinitésimos de segundo orden, β^2 , se deduce que

$$\operatorname{tg}(\theta' - \theta) = \operatorname{tg} \alpha \cong \beta \cdot \sec \theta,$$

que da, para $\theta = 90^\circ$, su valor máximo

$$\operatorname{tg} \alpha \cong \beta = v/c \quad (1)$$

III. EL TEST ASTRONÓMICO

Ahora bien, veamos qué ocurriría si la luz proveniente de nuestra estrella S viniera con una velocidad distinta a la considerada como constante, c , digamos, c' (menor) ó c'' (mayor).

Hemos visto en la Figura 1 que, dada la composición de \vec{c} con \vec{v} , el ángulo α resulta tal que $\operatorname{tg} \alpha = v/c$ –expresión similar a la (1). Dada la forma prácticamente circular de la órbita terrestre, podemos tomar a v como constante. Pues bien, en la relación (1) si c varía, también debe hacerlo α . Y aquí está el *meollo* de nuestro trabajo. Dada la interpretación que aquí damos a la aberración –similar a la que dio Bradley–, si bien no podemos medir \vec{c}_R , por las dificultades ya expresadas de la reemisión luminosa en el aire y en las lentes de cualquier instrumento que usáramos, sí podríamos registrar la variación de α . Notemos, por otra parte, que en las fórmulas relativistas para la aberración no aparece c como variable, ya que justamente considera a ésta constante, de modo que la velocidad radial de una estrella no puede influir en la aberración, en tales fórmulas.*

Para *ver* cómo influiría cuantitativamente esta variación de c en la aberración, juguemos ahora con los parámetros intervinientes en este fenómeno. Vamos a simplificar sus magnitudes para hacer más claro el concepto del orden de magnitudes: En la Figura 3 hemos representado nuevamente el caso de la Figura 1,

* Aquí aparece nuevamente una paradoja relativista: en su interpretación de la aberración y, en consecuencia, en la fórmula (1), v es la velocidad relativa entre el cuerpo celeste y la Tierra. De modo que la velocidad radial sí intervendría, con una incidencia directa de primer orden, en su valor. Este hecho ha sido destacado por varios autores, haciendo notar la inconsistencia práctica del enfoque relativista de este fenómeno, ya que no se producen en la realidad alteraciones de tal magnitud. El autor de este artículo tomó conocimiento recientemente de estos cuestionamientos gracias a los aportes recibidos de los Doctores J. Guala-Valverde, de la Fundación Julio Palacios, y T. E. Phipps, de Urbana, Illinois (EEUU). Dejo expresado aquí mi reconocimiento.

Referencias: Ives, H. E., "Extrapolation from the Michelson-Morley Experiment", J. Opt. Soc. Am., **40**, pp. 185-190 (1950) (Nota al pie); Phipps, T. E., "Relativity and Aberration", Am. J. Phys. **57**, pp. 549-550 (1989); Hayden, H. C., "Seller Aberration", Galilean Electrodynamics, pp. 89-92 (Sep-Oct 1993); Phipps, T. E., "Failures of Relativity Theory to Describe Starlight", Basis for a talk at Storrs, CT (EEUU-Jun 2003).

pero agregando los vectores \vec{c}' , de módulo menor que \vec{c} , y \vec{c}'' , de módulo mayor.

Tomemos $c = 300.000$ km/seg, y $v = 30$ km/seg. Tendremos que $\text{tg } \alpha = v/c = 1/10.000$. Para ángulos muy pequeños y expresados en radianes, el valor de su tangente es prácticamente igual al del ángulo. Podemos decir, expresándolo ahora en grados, que

$$\alpha = \frac{30}{300.000} \times \frac{360^\circ}{2\pi} \cong \frac{30}{300.000} \times \frac{360 \times 60 \times 60''}{6,2832} \cong 20,626'' \quad (2)$$

(Sabemos que el valor real aceptado hoy día para α es de $20,48''$). Veamos qué valores cabría esperar de α si c fuera disminuida en 300 km/seg, c' , o aumentada en 60 km/seg, c'' :

$$\alpha' = \frac{30}{299.700} \times \frac{360^\circ}{2\pi} \cong 20,647'' \quad (3)$$

$$\alpha'' = \frac{30}{300.060} \times \frac{360^\circ}{2\pi} \cong 20,622'' \quad (4)$$

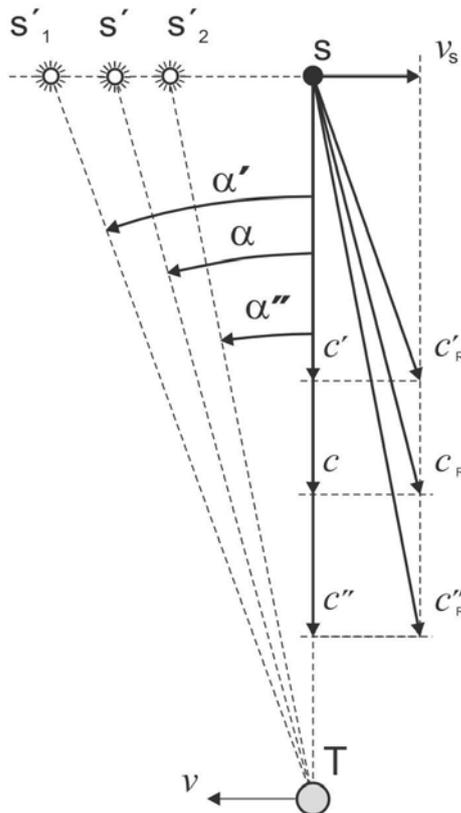


Figura 3: Aberraciones resultantes de distintos valores posibles de c , manteniéndose v y v_s constantes.

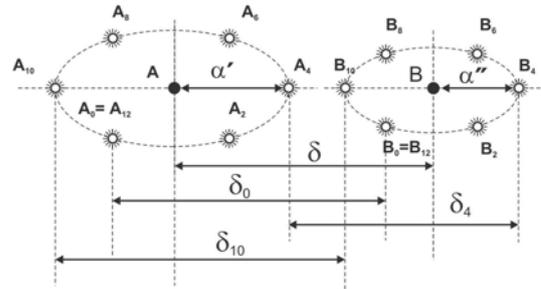


Figura 4: Variación posible de la distancia relativa δ de dos estrellas con distintas velocidades radiales, en el transcurso de un año.

Pues bien, estos podrían ser los casos para estrellas cuyas velocidades radiales fueran de +300 km/seg y -60 km/seg respectivamente, y la luz proveniente de ellas se viera disminuida o aumentada en estos valores. Si seleccionáramos un sector de la bóveda celeste en el que tuviéramos estas estrellas, visualmente cercanas, y lo observáramos a intervalos regulares en el transcurso de un año o más, tendríamos, de ser cierta la presunción de la variabilidad de c , pequeñas variaciones aparentes de sus posiciones relativas, producidas por las distintas aberraciones que tendrían cada una de ellas.

La Figura 4 muestra este caso, en que A y B son las posiciones reales de dos estrellas, con separación real δ (en segundos de arco), y velocidades radiales +300 y -60 km/seg respectivamente, y $A_2, A_4, A_6 \dots, B_2, B_4, B_6 \dots$ las sucesivas posiciones aparentes en observaciones realizadas cada 2 meses a partir de A_0 y B_0 , describiendo cada una una elipse de aberración distinta, por ser distintos sus ángulos α' y α'' . Las separaciones aparentes $\delta_0, \delta_2, \delta_4, \dots$ irán variando su valor con cada observación, $\Delta\delta$, y, para el caso de la figura, la máxima separación se dará entre las observaciones del mes 4 y el mes 10. Se demuestra fácilmente, por suma algebraica de segmentos, que $\Delta\delta_{\text{max}} = \delta_{10} - \delta_4 = 2(\alpha' - \alpha'')$. Este valor, para nuestro ejemplo, es

$$2(20,647'' - 20,622'') = 2 \times 0,025 = 0,05''.$$

El ejemplo brindado se ha realizado con parámetros verosímiles, y muestra un resultado que, si bien parece irrelevante para ser tomado como definitorio, la precisión de la Astrometría actual lo puede registrar. Obviamente, la conclusión sólo vendrá con el tratamiento estadístico de los resultados obtenidos, eligiendo convenientemente los sectores de la esfera celeste a observar, y programando una buena cantidad de observaciones. En este sentido, los cúmulos de galaxias lejanos son los que mayores velocidades radiales tienen, pero no puedo asegurar si pueden ser buenos referentes para el propósito que nos ocupa, por definición, brillo, etc. Si ese fuera el caso, por ejemplo, para el cúmulo Ursa Maior II, con velocidad radial de +41.000 km/seg, tendríamos $c' = 259.000$ km/seg, y $\alpha' = v/c' = 23,892''$.

Para este caso,
 $\Delta\delta_{\max} = 2(\alpha' - \alpha) = 2(23,892'' - 20,626'') = 6,532''$,
siendo α la aberración de una estrella visualmente cercana que pueda tomarse como referente. El valor que se obtendría para la diferencia aparente de posiciones daría, obviamente un resultado ponderable *prima facie*.

Creo innecesario destacar que, si bien hemos redondeado los valores de las velocidades, los órdenes de magnitud de los resultados son los mismos que los que obtendríamos usando los verdaderos.

Digamos por último, que hay estrellas con velocidades radiales del orden de los 500 km/seg y brillo suficiente para su correcto registro. Tal vez el caso ideal provenga de una doble visual de alta velocidad radial y cuyas componentes presenten también velocidades opuestas de significación.

De todos modos, será tarea de los astrónomos elegir los casos más convenientes para poder establecer con ellos un programa de observaciones que pueda brindar un resultado concluyente, tras el análisis estadístico correspondiente. Y hasta es posible que algún observatorio cuente con registros gráficos de observaciones realizadas con otros propósitos, que puedan ser utilizados para el de la presente propuesta.

IV. CONCLUSIÓN

El test propuesto consigue evitar el inconveniente, que aparecía inevitable, de hacer una medición de c con la luz atravesando un dieléctrico, como lo expresara Fox en su trabajo de la referencia 14. Y esto es así porque es justamente en el dieléctrico donde se produce la composición de velocidades –la de la luz con la del dieléctrico–, o el quiebre de la dirección de la luz, generador del fenómeno de aberración. Vale decir, que aquí el dieléctrico –la atmósfera o la lente de un telescopio espacial– no es un elemento “perturbador” sino “necesario” para poder hacer la medición, el ángulo de aberración α , en este caso.

De todos modos, lo expresado en este trabajo tal vez no sea más que un desesperado intento por salvar las estructuras lógicas del andamiaje de la Ciencia, tal como se construyó hasta la aparición de la Teoría de la Relatividad. El ajuste casi perfecto de los resultados experimentales a los previstos por las fórmulas de esta teoría, la sencillez de su expresión, y la ausencia de otra teoría que desarrolle fórmulas similares, hará presumir a la mayoría de los lectores que la TR saldrá airosa del test propuesto. Si éste fuera el caso, no quedarán dudas de su validez y del genio excepcional de Einstein en su capacidad de concebir o intuir una hipótesis que, contrariamente a lo expresado por él mismo en varias oportunidades, como vimos en este análisis, no contaba con fundamentación experimental decisiva, o estaba basada en interpretación errónea de los hechos experimentales. Y si no fuera éste el caso, el mundo científico deberá urgentemente desarrollar otro modelo que permita arribar a fórmulas similares a las brindadas por la TR pero sobre bases lógicas y comprobadas, lo que nos permitirá conocer mejor cómo *funciona* nuestro universo. Un modesto aporte en este sentido sería el propuesto en este trabajo.

Como una forma de abonar todo lo expuesto hasta aquí, voy a transcribir* sendos extractos de las publicaciones ya citadas de R. S. Shankland y H. Dingle, así como los párrafos finales de las Conclusiones de los trabajos de J. G. Fox. Estos últimos trabajos han constituido la base y el estímulo del presente artículo.

-“... Einstein me dijo que a Michelson no le gustaba la teoría de la relatividad. El le dijo esto a Einstein y éste lo había oído asimismo de otros. Einstein rió y agregó: ‘¿Usted sabe, nosotros fuimos muy buenos amigos!’ Michelson le había dicho a Einstein de que estaba un poco apenado de su propio trabajo, por haber dado lugar a este ‘monstruo’...”²³

-“Pero, cualquiera que fuere la solución correcta, la teoría electromagnética está tan íntimamente involucrada en toda la física subatómica que todo el tema debe ser sometido a revisión si la teoría de la relatividad es refutada, y la importancia de esto es tan grande, que un claro acuerdo sobre la cuestión, antes que velocidades cinemáticas no despreciables respecto de la de la luz resulten posibles, es imperativo. Esto demanda un genuino esfuerzo para examinar el tema con una mente completamente desprejuiciada. La impresión general que estas réplicas dan –el Prof. Dingle se está refiriendo a las recibidas de su publicación anterior en la que señalaba una contradicción en la TR²⁴– es que los obstáculos para la aceptación de mi argumento son principalmente psicológicos: mi comunicación ha sido leída, no para ver si lo que yo digo es correcto, sino para ver dónde está el error. Si mi crítica pudiera solamente conseguir el concebir la posibilidad de que fuera correcta, creo que verían en el acto que lo es; es así de simple.”²⁵

-“No obstante, si uno balancea las abrumadoras chances en contra de que tal experimento pueda producir algo nuevo, contra la abrumadora importancia del punto a ser testeado, uno puede concluir que el experimento debe ser llevado a cabo.”²⁶

-“Hay numerosas verificaciones indirectas de la relatividad especial. Después de todo, tenemos un satisfactorio cuerpo de teoría. Incluso al extrapolar muy lejos, el electromagnetismo relativista rinde excelente acuerdo con la experimentación, incluso en el campo de la electrodinámica cuántica. El dramático éxito de la ecuación de Dirac no necesita de ninguna elaboración. Este tipo de evidencia general en apoyo de la relatividad especial aparece abrumadora en su alcance y variedad. Esta es la razón para la vastamente sostenida creencia de que ninguna otra teoría podría explicar todos estos fenómenos. Sin embargo, debería ser realizado que estos éxitos no son realmente evidencia en contra de la teoría de Ritz. Lo que necesitamos es la demostración de que la teoría está en contradicción con la experimentación o que no es autoconsistente. Es con esto in mente que la relación de la teoría con la experimentación ha sido aquí examinada.”²⁷

Reconocimiento

Quiero expresar aquí mi gratitud a mi amigo, el Doctor José Astigueta de la CNEA, por su aliento para

mi intervención en el Congreso AFA 2003, y por conectarme con el Dr. Jorge Guala-Valverde, de la Fundación Julio Palacios, y, a través de éste, con el Dr. Thomas E. Phipps, de Urbana, Ill. (EEUU), ambos viejos lidiadores de los temas relativistas, dejando aclarado que sus menciones no implican su consenso.

----ooo00ooo----

Referencias

¹ Dingle, H., Special Theory of Relativity. Nature **197**, 1248 (1963).

² Einstein, A. The Principle of Relativity, trad. al Inglés por Saha & Bose (Calcuta, India: University Press, 1920). Trad. al Español por el autor del presente artículo.

³ Michelson, A. A. & Morley, E. W., Am. J. Sci., **134**, 33 (1887).

⁴ Shankland, R. S., Conversations with Albert Einstein. Am. J. Phys. **31**, 47 (1963).

⁵ Einstein, A., Mi Visión del Mundo ("Mein Weltbild"), trad. por Gallardo & Bübeck (Tusquets Editores, Barcelona, 1981) p. 167.

⁶ Einstein, A. El Significado de la Relatividad. ("The Meaning of Relativity", Princeton University Press, 1922), trad. por Prélat (Espasa-Calpe S.A., Madrid, 1971) pag. 38.

⁷ Bradley, J., Phil. Trans. Roy. Soc. (London) **35**, 637 (1728).

⁸ Airy, G. B. Proc. Roy. Soc. (London) **20**, 35 (1871); **21**, 121, (1873).

⁹ Fizeau, H. L. Compt. Rend. **33**, 349 (1851); Ann. Chem. Phys. **57**, 385 (1859).

¹⁰ De Sitter, W. Physik. Z. **14**, 429 (1913); **14**, 1267 (1913).

¹¹ Tomaschek, R. Ann. Physik **73**, 105 (1924).

¹² Struve, O. Stellar Evolution. (Princ. Univ. Press, Princeton, 1950) p. 27.

¹³ Fox, J. G., Evidence Against Emission Theories. Am. J. Phys. **33**, 1 (1965) (Este trabajo contó, en parte, con el soporte de la U.S. Atomic Energy Commission).

¹⁴ Fox, J. G., Experimental Evidence for the Second Postulate of Special Relativity. Am. J. Phys. **30**, 297 (1962).

¹⁵ Ritz, W., Oeuvres. (Gautier-Villars, Paris, 1911) ps. 317-492.

¹⁶ Cortés Pla, "Velocidad de la Luz y Relatividad" Espasa-Calpe Argentina S.A., Buenos Aires, 1947) p. 43.

¹⁷ Cortés Pla, Ref. 16, p. 36.

¹⁸ Stewart, A. B., The Discovery of Stellar Aberration. Scient. Am. (March 1964) p. 100.

¹⁹ Born, M. and Wolf, E. "Principles of Optics" (Pergamon Press, N. York, 1959) p. 100.

²⁰ Fox, J. G. Ref. 14. En Cap. II "The Extinction Theorem" encuentre un breve y claro análisis de este teorema de Ewald y Oseen.

²¹ Silvertooth, E. W., Special Relativity. Nature, **322** (8,14,1986).

²² Aspden, H., A Modern Test for the Ether?. Phys. Today, **132** (3, 19).

²³ Shankland, R. S. Ref. 4, p. 56.

²⁴ Dingle, H., Nature, **195**, 985 (1962).

²⁵ Dingle, H., Ref. 1, último párrafo.

²⁶ Fox, J. G., Ref. 14, p. 300.

²⁷ Fox, J. G., Ref. 13, p. 16.