

**ANÁLISIS INTRODUCTORIO PARA LA
COMPRENSIÓN DEL SEGUNDO POSTULADO DE LA
TEORÍA ESPECIAL DE LA RELATIVIDAD**

**ANÁLISIS INTRODUCTORIO PARA LA
COMPRENSIÓN DEL SEGUNDO POSTULADO DE LA
TEORÍA ESPECIAL DE LA RELATIVIDAD**

ESCRITO POR

ANDRÉS YESID SIERRA PAREJA

ASESORA: MARÍA MERCEDES AYALA

ENSEÑANZA DE LA CIENCIAS DESDE UNA PERSPECTIVA CULTURAL

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

BOGOTÁ D.C. 2014

**ANÁLISIS INTRODUCTORIO PARA LA
COMPRENSIÓN DEL SEGUNDO POSTULADO DE LA
TEORÍA ESPECIAL DE LA RELATIVIDAD**

ANDRÉS YESID SIERRA PAREJA

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE LICENCIAD EN
FÍSICA**

**ENSEÑANZA DE LA CIENCIAS DESDE UNA PERSPECTIVA CULTURAL
UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
BOGOTÁ D.C. 2014**


AGRADECIMIENTOS

El largo camino recorrido para la construcción de este trabajo, no hubiera sido el mismo sin el apoyo constante de personas que de una u otra forma, y que de manera directa o indirectamente, aportaron sus palabras, conocimientos, comprensiones y dificultades, que fueron de vital importancia para que las bases de este fueran lo más sólidas posibles. Es por todo lo anterior que me permito dar mis agradecimientos a las siguientes personas:

A Benedicto Sierra y a Diana Pareja, mis padres, quienes con su apoyo incondicional me impulsaron a dar lo mejor de mí en cada momento. A mis profesores de academia, que con sus discursos me permitieron abrir mi percepción de las cosas y a no aceptar teorías *per se*, sino a buscar una comprensión adecuada de las mismas. A mi asesora María Mercedes Ayala, que con su conocimiento, paciencia, disposición y dedicación, me impulso a buscar estrategias que me permitieran lograr una comprensión válida sobras las cosas, no solo en lo académico, sino en la vida diaria; además de esto, por aceptar y respetar mis ideas, dificultades y así mismo ayudarme a buscar un camino para plasmarlas y solucionarlas; sin su asesoría, el resultado no sería el mismo. A Martha Gonzales, por la colaboración y compañía durante este proceso. A Diego Rojas, quien se tomó el tiempo durante este proceso para ayudarme a aclarar dudas y aportar ideas significativas para la construcción de este trabajo. A Adriana Marcela Zambrano, por su completa entrega, dedicación y cariño que brindo para la construcción del presente trabajo y del libro desarrollado, aun cuando sus conocimientos académicos estén dirigidos en otra dirección; gracias por sus


inquietudes y consejos, los cuales fueron punto vital para que la redacción del texto fuera para un público más global y menos particular. A Oscar Alfonzo, Michael Sierra, Angela Sierra, Luis Bello, Daniela Rativa, que se tomaron el tiempo de leer el texto y reflexionar un poco acerca de la Teoría de la Relatividad, y la importancia de comprender las cosas, sin asumirlas como correctas.

Este trabajo está dedicado a mi Familia, mis compañeros de academia, a todas aquellas personas que buscan una explicación más allá de un porque sí y para todos aquellos que desean acercarse a la comprensión de la Teoría de la Relatividad Especial.

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <i>Escuela de Pedagogía</i>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 25-02-2014	Página 7 de 5	

1. Información General	
Tipo de documento	Trabajo de Grado
Acceso al documento	Universidad Pedagógica Nacional. Biblioteca Central
Título del documento	Análisis introductorio para la comprensión del segundo postulado de la teoría especial de la relatividad
Autor(es)	SIERRA PAREJA, Andrés Yesid
Director	Ayala María Mercedes
Publicación	Bogotá, UPN, 2014, p. 157
Unidad Patrocinante	Universidad Pedagógica Nacional
Palabras Claves	Comprensión, Sentido común, analogías, Teoría especial de la Relatividad, análisis, Segundo Postulado, sistema inercial, marco de referencia, ondas, movimiento rectilíneo uniforme, efecto Doppler, dilatación del tiempo, contracción de la longitud, suma de velocidades, velocidad de la onda, Gedanken, Experimento, fenómeno, evento.

2. Descripción
<p>Documento en el que se realiza un estudio y análisis a diferentes textos de física de tipo educativo, de divulgación e histórico filosófico de diversos autores, en los que se encuentra parcial o totalmente la presentación y/o explicación de la Teoría Especial de la Relatividad de Albert Einstein especialmente del Segundo Postulado.</p> <p>Es a partir de lo anterior, de las conclusiones obtenidas de dichos análisis, que surge la necesidad de desarrollar una propuesta alternativa enfocada principalmente a la presentación y explicación, no de la TER, sino de su Segundo Postulado, con el fin de divulgar y facilitar la interpretación de la teoría a un público en general interesado en relacionarse con la misma.</p> <p>Para llevar a cabo lo anterior, se utilizan aquellos aspectos que dentro del análisis de los libros se consideran pertinentes y significativos para la comprensión del Segundo Postulado y se refuerzan aquellos aspectos que son dejados de lado y que son de gran importancia para un público no conocedor de la Teoría. Para esto se emplean diferentes herramientas como las analogías, las experiencias sensibles y los eventos cotidianos, herramientas que son agrupadas en un lenguaje de fácil interpretación que permiten</p>

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <i>Formando al profesional</i>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 25-02-2014	Página 8 de 5	

un camino más cómodo para el lector hacia una orientación, reflexión, comprensión, interiorización y transformación de esas primeras ideas y conceptos que generalmente se tienen del mundo, direccionadas hacia una visión más científica y profunda sobre las mismas.

3. Fuentes

- Landau, L. y Rumer, R. (1985) Que es la teoría de la relatividad. Moscú: Mir.
- Sagan, C. (1980). Cosmos. España: Planeta.

Alonso, M y Finn, E.J. (1995). La teoría de la relatividad. Física (pp. 405-422). Estados unidos: Addison-Wesley Interamericana.


- Langevin, P. (1956). La evolución del espacio y el tiempo. Introducción a la teoría de la relatividad (pp. 13-44). Buenos Aires: Ediciones Leviatán.
- Tipler, P.A. (1993). Relatividad. Física para la ciencia y la tecnología, Tercera Edición, Tomo II (pp. 1099-1144). España: Reverte.
- Serway, R.A. y Beichner, R.J. (2002). Relatividad. Física para ciencias e ingeniería, Quinta edición. Tomo II (pp. 1245-1288). México: Mcgraw-Hill Interamericana de México.

Russell, B (1985). El ABC de la Relatividad (pp. 1-59). Orbis.

4. Contenidos

El presente trabajo está conformado por tres capítulos:

En el primer capítulo se elabora un resumen que en primera medida da respuesta al por qué del trabajo, y

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <i>Formando al profesional</i>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 25-02-2014	Página 9 de 5	

a la importancia que tiene la comprensión en el desarrollo del mismo. Así mismo, la forma en la que se abordaron los contenidos, teniendo en cuenta el análisis de algunos textos y los aportes de cada uno de ellos, y a la importancia que tiene el pensamiento común en el desarrollo y progreso de éste.


En el segundo capítulo se presenta la propuesta, es decir, un libro denominado **Análisis introductorio para la comprensión del segundo postulado de la teoría especial de la relatividad**. Se da un breve resumen de los contenidos de cada uno de los capítulos que hacen parte de éste y de la intencionalidad con que fueron escritos, texto que se presenta en toda su extensión en el anexo.

En el tercer capítulo, titulado UNA RUTA HACIA LA COMPRENSIÓN DEL 2º POSTULADO DE LA TER, se presenta el cuarto capítulo, y el sexto capítulo del libro propuesta no sin antes, desarrollar una breve introducción que ubique al lector.

5. Metodología

Se estudiaron un total de doce libros, tres de enseñanza de la física, uno histórico filosófico de la TER, y ocho entre textos de enseñanza y divulgativos de la TER. Tras finalizar la correspondiente lectura, se desarrollaba el correspondiente análisis de forma individual de cada texto teniendo en cuenta tres aspectos, el primero, el enunciado con el que describían el segundo postulado, el segundo, las explicaciones que daban a este, y la tercera, el desarrollo temático que abordaban para sumergir al lector a la TER.


De cada texto se anotan aquellas preguntas que de forma subjetiva, el autor considera son esenciales para llegar a la comprensión del postulado. Además de estos, se tiene en cuenta rasgos de cada texto que se consideran son necesarios para la comprensión del mismo; para ellos, se tiene en cuenta los siguientes aspectos: el primero, el uso de un lenguaje general, lo ameno de texto, la búsqueda de experiencias sensibles, la adaptación de las experiencias a nuevos eventos poco observables pero analizados lógicamente y la intencionalidad del texto.

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <i>Excellence in Education</i>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 25-02-2014	Página 10 de 5	

Teniendo en cuenta los aspectos mencionados y sumado al progreso académico del autor, se desarrolla una propuesta alternativa, un texto, que a diferencia de los textos estudiados, enfoca las temáticas únicamente hacia la comprensión del segundo postulado y no hacia la introducción de la teoría. EL texto propuesto ubica los tópicos de forma evolutiva, haciendo que el proceso de la lectura para una persona que nada sabe del tema, deba empezar en las primeras páginas y tras haber comprendido éstas, continuar con los posteriores capítulos.

6. Conclusiones

- A partir de la identificación de dificultades acerca de un tópico, y de vacíos encontrados en una investigación profunda en diferentes textos especializados acerca de los mismos, el docente puede desarrollar una herramienta que potencialice habilidades para la comprensión de dicho tópico.
- Las personas no tiene pensamientos o ideas equivocadas, pues es su forma de ver e interpretar el mundo, sin embargo, desde la mirada disciplinar, algunas de esas de esas ideas deben ser transformadas.
- La herramienta principal para dar comienzo a una transformación de pensamiento dirigida a una comprensión más científica, de los fenómenos de la naturaleza debe ser la visión inicial que tienen las personas de dichos fenómenos, visión que nace de sus experiencias o acercamientos científicos, pues son estas juntos con sus antecedentes el punto de partida y de continuación para crear una conexión entre esas visiones comunes y unas más disciplinares y especializadas, conexión siempre ligada por el conocimiento y la comprensión.
- Las personas tiene ideas e interpretaciones del mundo que parten de su experiencia y de su sentido común, ideas que en su mayoría no son compartidas por las visiones disciplinares, pero que deben ser respetadas y que deben ser tenidas en cuenta en todo momento por los especialistas que desean lograr una transformación comprensible de los fenómenos que ocurren en la naturaleza, y que les permita a las personas identificar sus vacíos conceptuales para que así

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>Excellence in Education</small>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 25-02-2014	Página 11 de 164	

<p> puedan reorganizar ellos mismos su visión e interpretación del mundo a un nivel más avanzado y cercano al predicho por la ciencia.</p> <ul style="list-style-type: none"> • El desarrollo progresivo y coherente de temáticas que van de una de menor nivel de complejidad a una de mayor nivel de complejidad, permite crear una linealidad en los argumentos que ponen de manifiesto lo mínimo necesario que debe ser comprendido para avanzar al siguiente nivel; si esto no es así, si una parte no queda lo suficientemente clara como para ser comprendida por el lector, se seguirán generando inconformidades con temáticas posteriores, perdiendo por completo el sentido de la orientación dada. • La comprensión de las leyes y/o principios que rigen a una teoría, permiten en primer lugar, darle sentido a lo que la teoría quiere expresar, y en segundo lugar, permite generar argumentos sólidos que van más allá de la aceptación <i>per se</i>. • Presentar la introducción a una teoría partiendo de experiencias y analogías vivenciales permite una mayor comprensión de la misma.
--

Elaborado por:	Andrés Yesid Sierra Pareja
Revisado por:	María Mercedes Ayala

Fecha de elaboración del Resumen:	13	12	2013
--	----	----	------

Contenido

CAPÍTULO I.....	10
1. ORIGEN Y FUNDAMENTOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE ESTE NUEVO PROYECTO.....	10
CAPÍTULO II.....	16
2. PRESENTACIÓN DE LA PROPUESTA DESARROLLADA	16
2.1. Estructura de la herramienta pedagógica, texto expositivo divulgativo.	17
2.1.1. Capítulo I. – Es relativo.	18
2.1.2. Capítulo II. – El movimiento uniforme y el principio de relatividad.	18
2.1.3. Capítulo III. – Espacio, tiempo, velocidad de la luz, simultaneidad: Mecánica clásica y electromagnetismo.	19
2.1.4. Capítulo IV- Ondas	19
2.1.5. Capítulo V. – Acerca de las bases de la teoría de la relatividad especial.	20
2.1.6. Capítulo VI. – Introducción al segundo postulado de la Teoría especial de la relatividad.....	21
CAPÍTULO III.....	22
3. UNA RUTA HACIA LA COMPRENSIÓN DEL 2° POSTULADO DE LA TER.....	22
3.1. Espacio, tiempo, velocidad de la luz, simultaneidad: Mecánica clásica y electromagnetismo.....	22
3.1.1. Introducción.....	22
3.1.2. Separación espacio y tiempo.....	28
3.1.3. Tiempo, Simultaneidad y Espacio	30
3.2. Del 2° postulado a la Teoría Especial de la Relatividad, de la Teoría Especial de la Relatividad al 2° postulado.....	38
3.2.1. Introducción.....	38
3.2.2. Análisis introductorio.....	41
3.2.3. El 1° postulado de la TER y la velocidad de la luz	44
3.2.4. Determinación de la velocidad de la luz para sistemas vistos en movimiento.....	47
3.2.5. Dilatación del tiempo, contracción de la longitud, suma de velocidades relativistas, efecto Doppler relativista y el 2° postulado.....	51

IV. CONCLUSIONES.....	65
V. Bibliografía	67
VI. Anexos.....	70
Anexo 1: Es relativo	70
Anexo 2: Movimiento Uniforme	75
Anexo 3: Ondas.....	91
Anexo 4: Acerca de las bases de la Teoría de la Relatividad Espacial	106
Anexo 5: Análisis de los Textos de enseñanza de la física de nivel universitario	124
Anexo 6: Análisis del texto Histórico Filosófico.	127
Anexo 7: Análisis de los textos de divulgación	130

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo es una propuesta en la que se desarrolla un análisis introductorio que acerque al lector a la comprensión del segundo postulado de la Teoría Especial de la Relatividad, sin tener que asumirlo como correcto a la fuerza, es decir, sin llegar a imponerlo sobre el sentido común del lector, sino por el contrario, sea él quien logre por medio de un proceso, reestructurar su pensamiento común y lograr dar sentido y significado a la teoría de una manera más argumentativa y coherente para luego sí, reconocerlo como correcto.

La presentación cómoda, argumentada y ejemplificada de los contenidos, ayuda y facilita al lector a ubicar en primer plano, aquellas dificultades que posiblemente desconoce y que son fuente de malas interpretaciones o, de simplemente aceptaciones a las que se debe someter para poder continuar con el abordaje de la teoría.

El Profesor German Bautista de la Universidad Pedagógica Nacional, en su lectura para el seminario de “física moderna: conocimiento y realidad” describe esta problemática de forma similar:

“en el campo de la enseñanza se suele, también, considerar que el periodo de la hoy llamada Física clásica se cierra con el establecimiento de la Teoría de Campo del electromagnetismo y que la aparición de nuevos datos empíricos FORZA la formulación de las teorías modernas. Sin embargo los textos de enseñanza más

populares (casi todos) no se toman el trabajo de indicar las motivaciones que llevaron a la obtención de estos nuevos datos empíricos, es decir, el por qué los físicos hicieron las medidas y los experimentos que los llevaron a conflictos con las teorías ya aceptadas. De esta manera se deja la impresión de que la gente comenzó a mirar las cosas con lupa “por que sí.” (Bautista s.f.:38)

A lo que agrega:

“parte de las dificultades surgen porque la mayoría de los docentes de física implícitamente asumen que basta con hacer una presentación clara y rigurosa de las teorías ya formalizadas para hacer de ella algo entendible” (Bautista s.f.:39)

Lo importante es hacer que los estudiantes y/o lectores reconozcan las dificultades que generaron nuevas imágenes del mundo, pero no es solo reconocerlas, es interpretarlas e intentar comprender el ¿cómo? y el ¿por qué? los físicos encontraron las dificultades y la forma como las analizaron. (León, 2002). Es poner en contexto al estudiante en la dificultad y al mismo tiempo en la comprensión de la solución.

Para lograr enfocar esto en la comprensión del segundo postulado de la TER, fue necesario desarrollar un análisis a libros de enseñanza de la física, histórico filosóficos de la Teoría de la Relatividad, y de divulgación de la teoría de la relatividad especial, sumado al progreso académico subjetivo del autor a lo largo de su recorrido en el interior de la Universidad Pedagógica Nacional.

Por tanto, su propósito es el de proponer una manera alternativa en la forma como se presenta el segundo postulado de la TER, partiendo desde lo más básico, hasta la complejidad de los argumentos que dentro de éste, se considera son importantes para la comprensión del mismo, con el fin de divulgar con un lenguaje sencillo los pilares de la TER y su vez, facilitar la comprensión de la misma.

CAPÍTULO I

1. ORIGEN Y FUNDAMENTOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE ESTE NUEVO PROYECTO

En la enseñanza de la teoría especial de la relatividad (TER) se presentan dificultades en la comprensión del segundo postulado por parte de algunos estudiantes, las que se constituyen en obstáculos para una apropiada comprensión de la teoría relativista en su totalidad; es así como los estudiantes se ven obligados a limitarse al manejo de la parte matemática y algorítmica de la teoría, omitiendo su aspecto conceptual.

Para que una teoría resulte inteligible es necesario comprender sus postulados y/o leyes; de no ser así, es muy difícil llegar a interiorizar y comprender con claridad lo que la teoría quiere expresar.

En ocasiones, se cree que por desarrollar ejercicios matemáticos sobre la teoría, se tiene pleno conocimiento sobre ésta, pero esto sólo da razón de lo hábil que se puede ser en la solución de ejercicios” matemáticos”, pues la comprensión de una teoría, no se trata de un simple despeje ni de obtener un resultado, ni de transformar una expresión matemática.

La comprensión, es algo mucho más complejo que solo transmitir información, o incluso, más complejo que saber manipular dicha información. Por supuesto, para

comprender hace falta integrar las dos ideas anteriores – transmitir y manipular-, sin embargo, comprender se enfoca más en la habilidad de pensar y actuar con flexibilidad a partir de lo que la persona sabe. (Stone Wiske, 1999)

Cuando alguien nos pregunta acerca del segundo postulado de la TER, aseguramos con firmeza las líneas que muchos maestros y textos se han encargado de reproducir constantemente, y que emergen como un eco en nuestra memoria; la constancia de la velocidad de la luz, y cómo esta debe ser igualmente medida y calculada para cualquier marco inercial.

Sin embargo, el pensar en el postulado no conlleva mayor dificultad, pues siempre nos sonará lógica la forma como este se describe, porque generalmente estamos pensando en velocidades bajas comparadas con la de la luz, situaciones donde perfectamente es posible acomodarlo; sin embargo, cuando imaginamos una situación en la cual nuestro campo vivencial no ha tenido la oportunidad de experimentar directamente, nos salimos de esa área de confort. Por ejemplo, cuando nos imaginamos viajes a velocidades cercanas a la de la luz y tratamos de suponer que un cuerpo se mueve a una velocidad cercana a ésta. Cuando esto ocurre, cuesta creer que las personas del tren que se desplaza a tal velocidad respecto a una estación que asumimos en reposo, calculen, a pesar de ello, que la luz se aleja de ellos a la misma velocidad de la luz en el vacío, exactamente la misma que calculará un observador que se encuentra en reposo respecto a la estación; Y ESTE ES REALMENTE EL INCONVENIENTE QUE SE PRESENTA.

Lo anterior conlleva a plantear las siguientes preguntas problemas:

¿Cómo los textos de enseñanza de la física explican y fundamentan el segundo postulado de la relatividad especial?, ¿Qué fundamentos hay que tener en cuenta para comprender este postulado? Y ¿Cómo podemos ayudar en la comprensión de este tipo de conocimiento?

Diferentes planteamientos se han levantado para dar justificación a este postulado, considerado por algunos como una propiedad común de todas las ondas (Tipler), como una exigencia del primer postulado (Serway), como un invariante físico (Alonzo), como un resultado experimental (Héctor A. Múnera), como rupturas frentes a visiones anteriores (Cosmos, Langevin), como la imposibilidad de una acción a distancia y por tanto la existencia de una velocidad límite de información, siendo la velocidad de la luz en el vacío esa velocidad límite (C. A. Cardona , P.Langevin, C. Sagan,, M. Gardner, B. Russell, J. H. Smith), entre muchas otras.

Un análisis más detallado de textos de divulgación, de enseñanza e histórico se presenta en los anexos de este trabajo, análisis que permitieron identificar ciertos interrogantes y conclusiones que considero son básicas para generar una transformación en la comprensión de la forma en que se comporta el mundo.

Debido a que en los textos analizados no existe, en mi concepción, un acercamiento directo a la comprensión del segundo postulado, puesto que cada uno de estos se remite directamente a trabajar sobre las consecuencias de la teoría; considero útil y pertinente la elaboración de una herramienta pedagógica, un texto expositivo divulgativo cuyo contenido re dirija el enfoque que fue común en los anteriores textos y que su propósito principal sea la comprensión del segundo

postulado a partir de la conjugación de analogías, ejemplos y vivencias en diferentes subtópicos, que paso a paso abrirán las puertas a cumplir el objetivo base.

Cada uno de los textos analizados, aporta en su medida diferentes aspectos, en diferentes ámbitos, en relación a la construcción de dicha herramienta pedagógica. En cuanto a los textos de enseñanza de la física, los vacíos que estos presentan se transforman en inquietudes que se convierten en parte esencial para limitar el tópico y así evitar tratar temáticas que no tengan ningún tipo de funcionalidad en el propósito del texto.

Por otro lado, el texto histórico-filosófico permitió comprender la importancia de escribir un camino que contextualice al lector, tanto histórica como filosóficamente, con el fin de apoyar y facilitar la comprensión de las respuestas que se brindan a las dificultades del desarrollo de fenómenos relacionados con la física.

Finalmente, los textos de divulgación por su parte, demuestran la importancia que tiene emplear un lenguaje asequible para la mayoría del público, pues esto contribuye al hecho de que una persona que sepa poco o nada del tema tendrá la misma posibilidad de entender que aquel que tiene gran experiencia en el campo.

Adicional a esto, me permitió comprender la gran utilidad de tener en cuenta el sentido común de los individuos y utilizar a este para que sea él mismo quien identifique las dificultades de su propio pensamiento y sea él mismo el promotor de su transformación.

Así mismo, el andamio sobre el cual se desarrolla la herramienta pedagógica para llegar al segundo postulado, se basa en los lineamientos mínimos empleados por los textos de divulgación para llegar a la TER.

A continuación se presentarán los lineamientos mínimos encontrados en el interior de los textos y las inquietudes más relevantes que surgen a partir de sus respectivos análisis, todo esto con el fin de llegar a la TER.

- Considerar lo qué es la relatividad, todo depende desde donde se mire
Relatividad
- Principio de inercia
- El principio de la relatividad en sentido restringido
- Qué es el movimiento rectilíneo uniforme
- La relatividad de un movimiento rectilíneo uniforme
- Velocidad máxima para transmitir información
- Análisis en el mecanicismo clásico en la simultaneidad, espacio y tiempo
- Análisis desde el electromagnetismo en la simultaneidad, espacio y tiempo
- Las ondas mecánicas y su análisis
- Las ondas electromagnéticas y su análisis
- La luz
- Experimentos MM
- Las ondas electromagnéticas y las mecánicas, sus relaciones y diferencias
- Los principios de la relatividad
- El desarrollo de la teoría de la relatividad

Además, el análisis de libros leídos, originó las siguientes preguntas que sin duda, son esenciales responder para comprender el postulado en cuestión.

- ¿Qué tipo de onda es la luz?
- ¿Qué características contiene este tipo de ondas?
- ¿Qué diferencia existe entre estas ondas electromagnéticas y las ondas mecánicas?
- ¿De qué depende y cuáles son las características de la velocidad de la onda?
- ¿Cuál es la influencia de la velocidad de la fuente respecto a las ondas?
- ¿La medición de la velocidad de una onda mecánica se verá afectada, si por el medio en el que se propaga, tiene un desplazamiento debido a una corriente del mismo?
- ¿Cuál será el resultado si cambiamos la onda mecánica por una onda luminosa?
- ¿Basta solo con el primer postulado para fundamentar la TER?
- ¿Acaso no son los dos postulados independientes?
- ¿Cómo sería la relatividad sin el segundo postulado?

CAPÍTULO II

2. PRESENTACIÓN DE LA PROPUESTA DESARROLLADA

En palabras de Einstein: *“lo que nos interesa es la velocidad de propagación del rayo (pulso) de luz respecto al vagón que se encuentra en movimiento”* (Einstein, PDF, p. 10), en mis palabras, ¿Por qué un vagón que se desplaza con una gran velocidad en la misma dirección en la que un pulso de luz se propaga, medirá que este se aleja de él a una velocidad C ?

Muchos responden a esta pregunta con un, porque sí¹, ya que de no ser así se entraría en conflicto con el primer postulado, y por tanto, sería posible identificar un marco de referencia privilegiado, tal como ocurre en las ondas mecánicas; pero honestamente y de manera personal, no me basta un “porque sí” para darle sentido a unas líneas que el mismo Einstein sumergió en su teoría para poder establecerla y darle sentido. A pesar de esto, si la única respuesta es “porque sí”, porque la naturaleza lo dice así a través de infinidad de experiencias, entonces quiero saber y comprender el cómo ocurre esto y el para qué ocurre esto.

Lo anterior es el eje motor de la propuesta desarrollada, y en ella se trata de dar sentido a esas preguntas teniendo en cuenta los aspectos mencionados al final del capítulo 1 del presente trabajo, aspectos que considero son importantes para la comprensión del segundo postulado y que son recopilados para la creación de un

¹ Ver Anexo 5, Anexo 6 y Anexo 7

libro conformado por 87 páginas divididas en 6 capítulos, denominado ANÁLISIS INTRODUCTORIO PARA LA COMPRENSIÓN DEL SEGUNDO POSTULADO DE LA TEORÍA ESPECIAL DE LA RELATIVIDAD, elaborado por el autor del presente proyecto.

Dada la extensión del texto, en el presente trabajo solamente se darán a conocer los dos capítulos del libro creado que se consideran son los más relevantes de entre los seis, los otros cuatro serán adjuntados en anexos (El cap 1 es Anexo 1, el cap 2 es anexo 2, el cap 4 es el anexo 3, el cap 5 es el anexo 4, y los capítulos 3 y 6 son adjuntados en este trabajo). Esto no quiere decir que los otros capítulos del libro creado no sean significativos para el lector, todo lo contrario, todos los capítulos son indiscutiblemente necesarios para cumplir el objetivo de la comprensión del postulado, pero debido a la extensión del mismo, solamente se mostraran los dos que se considera los más significativos para los propósitos de este trabajo entre los seis.

A continuación se desarrolla la descripción de los 6 enfoques (capítulos del libro creado) que se tuvieron en cuenta en el desarrollo del texto.

2.1. Estructura de la herramienta pedagógica, texto expositivo divulgativo.

Partiendo de los lineamientos anteriores y con base a las preguntas mencionadas, se desarrollan 6 capítulos que hacen parte del libro creado y que pretenden sean guía para la comprensión del segundo postulado de la Teoría especial de la relatividad (TER) y de esta forma se amplíe la percepción que tiene el lector sobre la TER.

Para mayor especificidad, se presentarán los aspectos más importantes desarrollados en cada uno de los capítulos del libro, pues el texto completo se encuentra en la sección de anexos. VER ANEXO.

2.1.1. Capítulo I. – Es relativo.

Este capítulo pretende introducir el concepto de relatividad en el lector, de identificar que la caracterización de las cosas y de los eventos depende desde donde se miren. Adicional a esto, está desarrollado de tal forma que el lector pueda hacer una relación entre lo que lee y su experiencia, lo que permitirá que este se sienta cómodo y en un ambiente ameno al momento de introducirse en el libro y de introducirse a lo relacionado con el principio de relatividad.

Así mismo, pretende hacer un acercamiento hacia la relatividad del tiempo y del espacio reconociendo que es necesario definir cuál es el punto de referencia, ya sea temporal o espacial.

2.1.2. Capítulo II. – El movimiento uniforme y el principio de relatividad.

A través de lo analizado en el primer capítulo, se crean eventos que permiten al lector comprender en planteamientos más complejos lo relacionado con el principio de relatividad; por medio de situaciones problemas, cuestionamientos e hipotéticas respuestas que se espera dé el lector en un primer momento, para luego, desarrollar una nueva situación en la cual el lector ha tenido una experiencia directa, de la cual obtiene nuevos resultados, resultados que van en contraposición con los obtenidos en la respuesta inicial.

Además de lo anterior, se especifica brevemente cuál es el principio de inercia, en qué casos se da este, y a través de las muchas experiencias que se realizan en estos sistemas, la invariancia de resultados que se originan en diferentes marcos inerciales.

2.1.3. Capítulo III. – Espacio, tiempo, velocidad de la luz, simultaneidad: Mecánica clásica y electromagnetismo.

El eje central de esta parte del capítulo es la simultaneidad, que es puesta en contraste entre la mecánica clásica, que acepta velocidades infinitas dentro de su descripción y la teoría electromagnética que define como velocidad máxima de información la velocidad con que se propaga la luz, que es finita. Desde esta perspectiva, se analizan las dificultades que se encuentran en las concepciones de espacio-tiempo que brinda la mecánica clásica, y se elabora un acercamiento, mayor al del primer capítulo, a la relatividad del tiempo y del espacio.

Todo esto a partir de situaciones hipotéticas que pondrán al lector en la situación de responder según su interpretación de mundo y que igualmente será puesta en contraste con el análisis desarrollado a lo largo del presente capítulo.

2.1.4. Capítulo IV- Ondas

El comienzo de este capítulo se enfoca en brindar una aproximación a lo que son las ondas mecánicas, por medio de situaciones cotidianas y se pretende que el lector reconozca las características más importantes de las mismas. Así mismo, que se contextualice superficialmente con el fenómeno denominado efecto Doppler, para

luego introducir las ondas electromagnéticas y establecer las diferencias y semejanzas que existen entre estas y las primeras (las mecánicas).

Después, se utiliza el experimento de M.M con el fin de confirmar las características de las ondas y la relación que estas guardan con el principio de relatividad, más no con el fin de argumentar si fue a partir de este que Einstein construyó o no la teoría de la relatividad, es por lo anterior que el experimento solo se tiene en cuenta por los resultados que arrojó y por los cambios teóricos a los que se enfrentaron los físicos de aquella época debido a dicho resultado.

Finalmente, se introduce la velocidad con la que se desplaza la luz.

2.1.5. Capítulo V. – Acerca de las bases de la teoría de la relatividad especial.

Este capítulo presenta las dificultades que se originaron al intentar relacionar la mecánica clásica y el electromagnetismo impulsados por el principio de relatividad, que a partir de este punto, se encontraba en ambas teorías, la solución a esta dificultad se plasma en la teoría de la relatividad espacial desarrollada por Albert Einstein. Y es a partir de esto que se plantean situaciones en las cuales se calcula la velocidad de la luz conceptualmente, para un sistema de baja velocidad, cotidiano, y un sistema que se mueve con velocidad constante a una velocidad muy cercana a la de la luz.

2.1.6. Capítulo VI. – Introducción al segundo postulado de la Teoría especial de la relatividad.

Todo lo visto en los anteriores capítulos, converge en este capítulo. Pues es en este, donde se analiza la situación detenidamente del por qué una persona en un vagón que se desplaza en el mismo sentido en el que se propaga un rayo de luz, calcula que este se aleja de él a exactamente la velocidad de la luz y además que para un observador en reposo respecto a los dos, se alejan o se acercan de este a exactamente la misma velocidad de la luz.

CAPÍTULO III

3. UNA RUTA HACIA LA COMPRENSIÓN DEL 2° POSTULADO DE LA TER

3.1. Espacio, tiempo, velocidad de la luz, simultaneidad: Mecánica clásica y electromagnetismo

3.1.1. Introducción

El desarrollo de la física cambia de acuerdo a las necesidades que se presentan en determinada época y a las herramientas sobre las cuales se pueden percibir y analizar diferentes fenómenos. A medida que aumenta la comprensión sobre la naturaleza, se desarrollan nuevas herramientas que permitirán desarrollar análisis más profundos sobre los eventos cotidianos, lo que a su vez abrirá nuevos horizontes para la investigación que quizás con el tiempo, dejan de ser tan perceptibles en la cotidianidad y tan tangibles para el sentido común.

Así, el desarrollo de la mecánica clásica da explicación a muchos eventos que ocurren diariamente y los plasma de modo que corresponde, en cierta forma, con lo que denominamos nuestro sentido común². Esta es la física que nos muestran en la mayoría de colegios, debido a los estándares de educación en Colombia, y por tanto, es con esta mirada que crecemos y desarrollamos nuestras actividades; además de esto, porque la teoría funciona acorde a la experiencia.

² Es importante tener en cuenta que desde mi perspectiva, el sentido común no es estático, sino que evoluciona de acuerdo a la comprensión que se tenga del mundo.

Por tanto, vemos los eventos del mundo como soluciones a planteamientos vistos y analizados desde la mirada Newtoniana. Sin embargo, la mecánica clásica trae consigo dificultades que no son expuestas en las aulas de clases; dificultades que fueron origen para repensar si en realidad las leyes fundamentales de la naturaleza se podían describir a partir de esta determinada visión clásica.

En los anexos 1 y 2, se describen algunas ideas básicas sobre lo que es relativo, y se ilustra un poco en situaciones que nos permiten revisar las concepciones de tiempo, espacio y movimiento rectilíneo uniforme que serán de utilidad para lo que se presenta a continuación.

Para hablar de un movimiento es necesario contemplar un mínimo de dos puntos que hagan tangible un desplazamiento; por supuesto, dichos puntos no pueden pertenecer ni estar en el interior de un mismo sistema de referencia. Es necesario un mínimo de dos sistemas de referencia, uno afuera del otro, en un único marco de referencia para poder identificar un cambio, que tratándose de movimiento, será de posición en el tiempo, y que nos permitirá determinar si existe un movimiento en alguno de los sistemas. De no ser así, si no identificamos un punto externo al sistema en que estamos ubicados, o si lo identificamos pero siempre permanece en la misma posición respecto al sistema de referencia en el que estamos, no tenemos argumento alguno para concluir que existe un movimiento por parte de alguno de ellos.

Concluimos que la luna se mueve alrededor de la tierra, porque su observación desde la superficie terrestre ocupa diferentes lugares de esta, siempre la

vemos en un lugar diferente, cuando es posible observarla. Si la luna permaneciera siempre en un mismo lugar, por ejemplo, encima del Santuario de Monserrate, nos sería imposible decir que la luna se mueve en el espacio respecto a nosotros, porque siempre permanecería quieta, desde nuestro punto de vista.

Para el caso anterior, la luna formaría parte del marco de referencia de la tierra, de la misma manera lo hacen los todos los objetos en reposo respecto a tierra, la lámpara, una mesa de noche, un árbol, una montaña, etc.

Todo esto, junto con lo descrito en el anexo 2, permite desarrollar un acercamiento, una pequeña reorganización a nuestra forma de ver el mundo y comprender que nuestro sentido común, poco a poco se va organizando para comprender parte de lo que ocurre en la naturaleza.

Este tipo de cambio o de reorganizaciones tardaron muchos siglos en darse en el transcurso de la historia de la humanidad, y sus primeros pasos, se podrían atribuir a Copérnico, y su modelo heliocéntrico del sistema solar. Esta idea para nosotros actualmente es natural, porque desde pequeños se nos ha indicado que es la Tierra la que rota alrededor del sol, más sin embargo, si nos llegasen a preguntar la razón por la cual se llegó a esta conclusión, más de uno nos quedaríamos en silencio y la única respuesta inmediata sería, porque así nos lo dijeron.

Esto es un punto realmente importante, pues aunque para nosotros esto suele ser obvio, para aquellos que les tocó vivir el nacimiento de este nuevo pensamiento, fue casi incomprensible y en muchos casos hasta ridículo, de acuerdo a su postura política o religiosa; pero te aseguro querido lector, que la próxima vez que analices

un movimiento, cualquiera que sea, ya no lo veras con los ojos que lo veías al inicio de este libro pues ya tienes nuevas herramientas para comprender lo relacionado con el movimiento uniforme, tanto así que con el tiempo notarás que dicha comprensión hará parte de tu sentido común, y te encontrarás con nuevos problemas a los que también espero responder. Antes de plantear esos problemas, es necesario retroceder un poco en la historia de la física.

Como ya lo hemos mencionado, el relativismo en la mecánica clásica ya era un hecho. No es posible determinar por medio de experiencias mecánicas (Saltar, lanzar, correr...) si un sistema de referencia inercial viaja con velocidad constante o permanece en reposo analizado desde el mismo sistema. Esto es un hecho que no puede ser refutado y que se ha comprobado ininidad de veces desde algunas de las experiencias diarias hasta grandes demostraciones experimentales.

Si todo lo que hemos abordado en la mecánica Newtoniana lo contempla, entonces ¿cuál fue la necesidad de analizarla minuciosamente hasta llegar a la Teoría de la Relatividad Especial? Para responder esto, es necesario poner en contexto varios puntos que pongan de manifiesto las irregularidades que se tratan dentro de la teoría clásica de la mecánica y que dieron pie para el desarrollo de una mecánica más sólida y ligada con una realidad universal, y no parcial, ni local.

Uno de los puntos más importantes para resaltar, es la forma como la mirada clásica observaba un evento y lo ubicaba tanto espacial, como temporalmente.

Pero antes de comenzar quiero que nos cuestionemos ¿qué es el espacio y el tiempo para nosotros? pues es a partir de este planteamiento, como nosotros damos

sentido, no solo al mundo, sino también a los eventos que ocurren dentro de él. Responderé esta pregunta desde mi apreciación inicial personal, es decir, antes de conocer de la teoría de la relatividad y de semestres intentando comprender todo lo que ésta conlleva.

En un principio, concebía el tiempo como una creación elaborada por el hombre con el único fin de organizar su vida, no en el sentido de la ubicación espacial, sino de organizar unidades temporales para elaborar tareas y demostrar eficiencias, orden y rapidez ante otros individuos. Es por esto, que el tiempo para mí, no era más que una simple herramienta de medida creada y diseñada por el hombre y para el hombre, era una relación de problema de orden, no era una esencia de la naturaleza; el tiempo existía porque el hombre³ existe y por tanto, era una medida única y universal; el cambio de horarios, solo dependía de la selección de una porción de la tierra respecto al sol, pero en sí, el tiempo era el mismo. En cuanto al espacio, le atribuía un carácter más de lugar, un escenario donde podían existir cuerpos y permanecer en ellos, donde podían moverse o permanecer inmóviles. Esta era mi mirada de espacio y tiempo.

Todos creamos una idea acerca de algo, esto no quiere decir que sea correcta o la falsa, tan solo son ideas propias que con el tiempo vamos ordenando y conceptualizando en mayor profundidad, pero que son la respuesta a nuestra forma de ver y comprender las situaciones que ocurren en el mundo, y a su vez, son las que dificultan acercarnos a ideas que no son compatibles con ellas.

Desarrollar esta idea de forma personal, pondrá en evidencia las consideraciones iniciales sobre las cuales se sustentan sus apreciaciones acerca del estado del movimiento de un cuerpo, para así ser conscientes del significado de espacio y tiempo para ustedes y lograr confrontarlo con la mirada mecanicista clásica y relativista.

³ Acá se entiende al hombre en un sentido genérico y universal.

El mecanicismo clásico, considera el tiempo para responder a dos preguntas, ¿cuánto dura? y ¿cuándo ocurre?, considerando que es la duración temporal de algo lo que es asumido como universal, independiente de la posición que ocupe un observador o de su estado de movimiento. Bertrand Russell en su libro El ABC de la Relatividad dice:

Los únicos elementos arbitrarios en el cómputo del tiempo eran la unidad y el punto del tiempo desde el que comenzaba dicho cómputo. Se podría medir según la hora de Greenwich, de París o de Nueva York. Esto constituía una diferencia en cuanto al punto de partida. Se podía medir en segundos, minutos, horas, días o años. Era una diferencia de unidad. (Russell, B. PDF, p 32)

Cuando hablamos del espacio absoluto que se describe en la Mecánica Newtoniana, nos referimos a marco de referencia respecto al cual se puede describir las leyes de movimiento, es decir, un espacio como realidad física donde se dé el movimiento. (Cárdenas y Botero, 2009. PDF. p. 53)

Algunas de las propiedades más relevantes para destacar⁴ de espacio absoluto newtoniano son:

- Existe como necesidad de encontrar un marco de referencia al cual referir las leyes del movimiento.
- Es un espacio infinito que permanece siempre uniforme e inmóvil.
- Es un ente que no depende de otros objetos para existir.
- Este ente actúa sobre los cuerpos⁵, pero estos no actúan sobre ella y basado en esta idea Newton desarrolla su demostración de la existencia del espacio absoluto por medio de su famoso experimento del balde de agua.

⁴ Tomado de (Cárdenas y Botero, 2009. PDF. p. 54)

⁵ Esa acción se manifiesta o se consideraba que se manifestaba en la aparición de las fuerzas ficticias, como por ejemplo la fuerza centrífuga, de esta manera se explica porque un cuerpo que gira o que rota se deforma (sus partes se alejan del eje de rotación-experimento del balde)

Se puede decir entonces que el espacio absoluto, es considerado como un sistema de referencia único, invariante, que actúa sobre los cuerpos sin que los cuerpos actúen sobre él; es un sistema privilegiado, un sistema estático y universal, en el cual se desarrollan y analizan fenómenos de movimiento.

Dado que su naturaleza sería inmóvil y uniforme, se catalogaría como el marco de referencia privilegiado para describir el movimiento de todos los demás cuerpos y además, darle sentido a la ley de la inercia. Pero ¿Dónde está el problema? Como se mencionó anteriormente, no nos es posible determinar si nos movemos con movimiento uniforme o si permanecemos en reposo respecto a otro observador, siempre y cuando nosotros permanezcamos dentro de un marco de referencia diferente al de él.

Según lo anterior, podemos insistir en que a la vez que el espacio absoluto establece la equivalencia entre el reposo y el movimiento uniforme, niega toda posibilidad de determinar por medios mecánicos su existencia, cuando se miran estos fenómenos desde sistemas de referencia inerciales.

3.1.2. Separación espacio y tiempo

Los planteamientos anteriores, suponen dos puntos de partida completamente independientes, no necesitamos recurrir al tiempo para ubicar espacialmente a un evento, ni recurrir a la ubicación espacial para ubicar temporalmente un evento, y es necesario estudiar qué tipo de dificultades trae consigo este tipo de planteamientos.

Para ubicar espacialmente el lugar donde ocurre un evento un dentro de la mecánica clásica, localizamos el punto en el espacio de 3 dimensiones (Ejes: X, Y, Z)⁶, lo que brindará por ejemplo información básica de la posición del cuerpo en el espacio, respecto a otro punto que se toma como el origen del sistema de referencia. El tiempo, por otro lado, es considerado como un medio para dar cuenta de la evolución temporal del movimiento del cuerpo, i.e. de su cambio de posición a través del tiempo, y en nada afecta la ubicación de su posición en el espacio.

Además, en el libro el ABC de la relatividad Russell afirma que:

... Se creía que el método de fijar la posición en el espacio y el método de fijar la posición en el tiempo podía hacerse de forma totalmente independiente el uno del otro. Por estas razones, la gente consideraba que el tiempo y el espacio eran dos cosas completamente distintas. (Russell, PDF, p.32)

Según la visión newtoniana, para la ubicación espacial de un cuerpo, es prescindible el tiempo, y el problema que esto conlleva es que muchos cuerpos podrían ser ubicados espacialmente en un mismo punto y en un mismo instante, lo cual no tiene sentido; se tiene que pensar, que para que dos cuerpos diferentes puedan ocupar un mismo lugar, lo deben hacer en diferentes momentos.

Pues bien, Bertrand Russel agrega lo siguiente, refiriéndose a la ocupación de un mismo lugar en el espacio:

En la vieja teoría era posible considerar un número de cuerpos en el mismo instante, y puesto que el tiempo era el mismo para todos, podía prescindirse de él. Pero ahora no podemos hacer eso si queremos obtener un resultado objetivo de los hechos físicos. (Russell, PDF, p. 37)

⁶ El espacio en tres dimensiones se entiende como el cruce perpendicular entre tres planos cartesianos, describiendo con profundidad, altura y lateralidad la posición en el espacio de un evento, siendo el origen el cruce de los tres planos.

Es por esto, que es necesario tener en cuenta la dimensión temporal para la ubicación espacial de un evento. Si no es tenido en cuenta, sería como ubicar espacialmente muchos cuerpos en un mismo lugar e instante, lo cual no es posible. En otras palabras, es posible separados, de otra manera serían idénticos.

3.1.3. Tiempo, Simultaneidad y Espacio

Teniendo en cuenta la visión que se tenía del tiempo en la mecánica newtoniana y que se ve de alguna manera replicada en el contexto cotidiano, en la cual las escalas temporales de duración van desde el segundo como tiempo mínimo a órdenes de siglos. Cuando pasamos a un mundo donde el tipo de experiencias son de otra escala de tiempo como puede ser el mundo de las partículas subatómicas de duración de órdenes de nanosegundo o pasamos al mundo de los grandes tiempo como el de las estrellas, ya no nos vemos obligados a considerar que las cosas funcionan necesariamente de la misma manera al que estamos acostumbrados vivir.

Por otro lado, Bertrand Russell refiriéndose al carácter absoluto del tiempo concebido por la mecánica newtoniana y en nuestro mundo cotidiano, indica lo siguiente:

Ya no existe un tiempo universal que se pueda aplicar sin ambigüedad a cualquier parte del universo. Sólo existen diversos tiempos ((propios)) de los diversos cuerpos del universo que coinciden aproximadamente en dos cuerpos que no tienen un movimiento rápido, pero que no coinciden exactamente nunca, a no ser que sean dos cuerpos en reposo y en relación mutua. (Russell, PDF, p. 32)

Experimentos que son relacionados con el tiempo de vida de pequeñas partículas subatómicas, que aceleradas hasta velocidades cercanas a la velocidad de la luz, logran dilatar su tiempo de vida, nos hacen repensar nuestra idea del tiempo. Más adelante trataremos este tema y los cambios teóricos y conceptuales que esto conlleva.

Otro gran problema que se encuentra en la mecánica Newtoniana, está presente en nuestra inicial de simultaneidad de eventos, y la consideración de velocidades infinitas.

El punto clave sobre el cual centraré la discusión acerca de la simultaneidad, es que en la mirada Clásica, al igual que el tiempo y el espacio, también posee un carácter absoluto. Dos eventos que ocurren en diferentes puntos en un mismo instante, será descrito por todos los observadores, independiente de su posición, como eventos simultáneos.

Hasta acá, no hay mayor dificultad, si los eventos tiene lugar en el mismo instante, deben ser simultáneos. Sin embargo, las cosas parecen cambiar cuando se tiene en cuenta la distancia que separa los eventos, la distancia entre los observadores y la distancia entre los observadores y los eventos. Veamos por qué:

Supongamos que de nuevo el hombre viaja a la luna, y que el astronauta en ella, mira maravillado la grandeza de nuestro planeta. Pasado el tiempo, el astronauta continúa con su misión y se dispone a construir un inmenso bombillo que se encenderá cuando apunte hacia el planeta tierra. Por otro lado, el transbordador espacial que dejó al astronauta se encuentra haciendo observaciones a la luna y a la

tierra, ubicado a exactamente a la mitad de la distancia entre la tierra y la luna⁷. Los astronautas a bordo de trasbordador, observan una fuerte iluminación en el suelo terrestre, como si algo hubiera explotado y, además ven simultáneamente que el astronauta en la luna ha encendido el enorme bombillo. Para los pasajeros del transbordador, la explosión y el bombillo alumbrado de la luna se iluminan en el mismo instante. ¿Podría asegurarse que los dos eventos fueron simultáneos?

En el ejercicio encontramos que para los pasajeros del transbordador espacial, los dos eventos (las explosiones) ocurrieron simultáneamente, pero ¿Estos serían simultáneos para el astronauta en la luna, o para los observadores curiosos de la tierra que se encuentran cerca de la detonación?

La mecánica clásica, aseguraría que los dos eventos son simultáneos para los tres tipos de observadores (los que están en la Tierra, el astronauta en la Luna y los pasajeros del transbordador), pues no existe una velocidad límite de información. Esta mirada es comprensible si tenemos en cuenta que la mayoría de sucesos que ocurren en la tierra, no están lo suficientemente separados como para notar que quizá, las cosas ya han sucedido y que solo observamos el pasado de un cuerpo.

Para nosotros es común encender un bombillo por medio de un interruptor, y la impresión de instantaneidad que esta nos brinda. Tan pronto como subimos el interruptor con la mano, la habitación se encuentra completamente iluminada. Si nos encontramos en un inmenso salón, y en él, hay personas distribuidas al azar, y

⁷ Cabe aclarar, que las velocidades de la tierra, la luna y los tripulantes del transbordador es muy pequeña compara con la velocidad con que se propaga la señal de luz, y por tanto podrían considerarse como sistemas en reposo unos respecto a los otros.

ocurre algún evento como alguien lanzando una pelota al suelo, todos ven exactamente el mismo movimiento en el mismo instante. Todo en nuestra vida parece ser instantáneo.

Pero si nos sumergimos en escenarios de grandes distancias, como la de la tierra a la luna (que a pesar de ser una distancia enorme, es una pequeña distancia en este inmenso universo) observamos que las cosas no suceden igual que si los eventos se dieran en tierra firme. Antes de responder la pregunta de si son o no simultáneas para los otros dos observadores, debemos tener en cuenta que la velocidad de la luz, tiene un límite, que en el vacío es de aproximadamente unos ¡300,000.000 Km/h! eso sí que es rápido.

Lo que nosotros podemos observar, se da porque la luz ha rebotado del objeto golpeado a nuestros ojos, y dado que la luz tiene un límite, gasta cierto tiempo en llegar a nuestros ojos... pero la velocidad de la luz, al ser tan grande y trabajarlas con distancias relativamente pequeñas (del orden de cientos de kilómetros, por ejemplo 100 kilómetros), las cosas parecieran que fueran instantáneas.

Por el contrario cuando observamos las estrellas, estamos observando el pasado de las mismas, debido a que la luz puede tardar varios años en llegar a la Tierra, dependiendo de qué tan lejos se encuentre la estrella de la Tierra; puede suceder incluso, que esa estrella que observamos viva y brillante, en ese mismo instante ya no exista.

Si la luz de la estrella tarda 5 años en llegar a la tierra, se dice que la estrella se encuentra a 5 años luz de distancia, es decir, que la luz tarda cinco años en llegar

a la tierra, y por tanto, no observamos la estrella en la actualidad, sino como era hace 5 años. Si por ejemplo pudiéramos observar a un niño en una estrella que se encuentra a 20 años luz de la tierra, observaríamos actualmente a un niño, que muy posiblemente es un adulto 20 años mayor; así mismo, si en esa estrella pudieran observarnos, verían la luz de la tierra que empezó su viaje 20 años atrás y por supuesto, a nosotros de jóvenes, o incluso, a nuestros padres sin nosotros.

Ahora sí, para responder la pregunta, deberíamos saber cuál es la distancia entre la tierra y la luna, para mirar si la distancia es muy pequeña comparada con la velocidad de los pulsos que nos informan sobre las explosiones ocurridas, y así mirar si no están observando el pasado de algo, y más aún, poder aclarar cuál es, dependiendo del observador, el orden de los eventos en cuestión.

La distancia promedio entre la tierra y la luna es de 380000 Km, y siguiendo la mecánica clásica, significaría que la luz tarda aproximadamente 1,28 segundos en viajar de la tierra a la luna. Por tanto, los pasajeros en el transbordador al estar a mitad de camino entre la Tierra y la luna, recibirán en la mitad del tiempo la señal de la luz (0,64 segundos, para ambos recorridos), y por tanto, ellos, que han observado el destello del bombillo y la explosión terrestre simultáneamente, tendrán que concluir que los dos eventos ocurrieron simultáneamente; esto no quiere decir que observan cada evento en el instante en que sucedieron. **Por tanto es muy importante tener en cuenta la diferencia que hay entre el momento en que ocurren los eventos, y el momento en que se recibe la información sobre esos eventos, que dependerá exclusivamente del recorrido que tenga que hacer la señal de luz para llegar a observadores en diferentes ubicaciones.**

En este orden de ideas, cuando el astronauta en la luna observa la explosión que ocurrió en la tierra, ya habrán pasado 1,28 segundos desde que ocurrió la explosión en tierra; así mismo, cuando los observadores en la tierra pueden ver el destello en la luna, también han transcurrido 1,28 segundos desde que ocurrió dicho evento. Por el contrario, el astronauta en la luna, observa su explosión en el mismo tiempo en que esta ocurre, análogo a lo que ocurre con los observadores en tierra y la explosión que ocurre en ella. Al observador que está en el lugar en que ocurre el evento⁸ lo denominaremos **observador local** y en caso contrario **observadores distantes**.

En conclusión para la situación, puede calcularse y decirse que si bien ambos eventos tuvieron lugar en diferentes puntos, lo hicieron en los mismos instantes, y que la observación del orden de los eventos varía dependiendo de la ubicación del observador en cuestión respecto a los lugares donde ocurren los eventos considerados; por ejemplo, para las personas cercanas a la explosión en la tierra, sería primero la explosión y después de 1,28 segundo el destello de la luna; para el astronauta en la luna sería primero el encendido de la bombilla que él causó, y 1,28 segundos después la iluminación de la tierra a causa de la explosión. Las dos tardan 10 segundos en durar, pero dependiendo de dónde nos ubiquemos, el evento contrario acabará 1,28 segundos después de que acabe el evento local.

⁸ O en términos más precisos, la distancia involucrada en el recorrido de la señal de información, de la señal de luz es despreciable, y será despreciable en la medida que el tiempo de recorrido de la señal así lo sea; respecto al orden de medidas que se maneje; si se manejan ordenes de segundos cientos y miles de kilómetros serían despreciables; pero, si se manejan tiempos del orden de nano segundos, 1metro es una distancia muy grande.

En términos más generales se podría concluir entonces, que los eventos ocurridos simultáneamente en lugares diferentes no son observados simultáneamente por observadores distantes, a menos que el observador esté ubicado de modo tal que las distancias recorridas por las señales de luz que le informan sobre la ocurrencia de los eventos sean iguales.

En palabras de Bertrand Russell, en su libro El ABC de la Relatividad:

Podemos ahora recapitular las razones que hicieron necesario sustituir (espacio-tiempo) por espacio y tiempo. La antigua separación de espacio y tiempo se basaba en la creencia de que no había ambigüedad en afirmar que dos hechos en lugares distintos sucedían al mismo tiempo. En consecuencia se pensaba que podíamos describir la topografía del universo en un momento dado y en términos puramente espaciales. Pero ahora que la simultaneidad resulta relativa a un observador particular, ello ya no es posible. (Russell, PDF, p.36)

Lo planteado hasta el momento junto con lo planteado en el anexo 1 y 2, ponen en evidencia algunas dificultades sumergidas en la argumentación ofrecida por parte del mecanicismo clásico a su cosmovisión de espacio y tiempo y simultaneidad, dificultades que son solventadas por la cosmovisión electromagnética al identificar una velocidad límite de propagación de información.

Como vimos anteriormente, discutimos acerca de la simultaneidad de los eventos, y que esta depende en parte del observador, de la distancia que lo separa del evento y del tiempo que tarda la información desde que sale hasta que llega a dicho observador. Aclaramos, además, que la velocidad con que se desplaza dicha información, corresponde aquella de la señal de luz que procede del lugar donde ocurre el evento y llega al observador del caso haciéndolo perceptible, y que por tratarse de la luz, su velocidad es de aproximadamente unos 300.000 km/s en el

vacío, teniendo en cuenta que este valor puede variar dependiendo el medio sobre el cual se propague.

Las ideas planteadas hasta el momento no surgieron como parte del análisis de la mecánica clásica, de hecho, esta ignoraba por completo este tipo de argumentaciones. No fue sino hasta la aparición del electromagnetismo que se logran consolidar en plenitud las dificultades que la teoría clásica presentaba; como por ejemplo, las velocidades infinitas, y con ello, la disposición para argumentar un espacio absoluto, un tiempo absoluto y la simultaneidad.

El desarrollo teórico y experimental del Electromagnetismo da soporte a las afirmaciones acerca de la velocidad de la luz, y son quienes concluyen que una de las características de la luz es que es finita, y tarda un determinado tiempo en viajar de un punto a otro, es decir, e a diferencia de lo que pensamos comúnmente, no es instantánea.

Langevin, en su libro *Introducción a la Relatividad* habla acerca del Electromagnetismo de la siguiente manera:

La concepción electromagnética exige un cambio profundo de la noción de universo. Las ecuaciones del electromagnetismo implican, en su forma habitual, que una perturbación electromagnética, una onda luminosa, por ejemplo, se propaga en el vacío con la misma velocidad en todas las direcciones, igual a trescientos mil kilómetros por segundo poco más o menos. (Langevin, 1956)

Es gracias a la conclusión dada por el electromagnetismo que se permite llegar a los planteamientos vistos en este capítulo, y fue la razón para el cambio de las características del espacio y del tiempo, dando a sus vez, los primeros pasos

para replantear la vieja teoría y construir los pilares de una nueva, la teoría de la relatividad especial.

3.2. Del 2° postulado a la Teoría Especial de la Relatividad, de la Teoría Especial de la Relatividad al 2° postulado

3.2.1. Introducción

Einstein describe sus dos únicos postulados para esta nueva teoría denominada, Teoría Especial de la Relatividad:

1. *Las leyes de acuerdo a las cuales cambian los estados de los sistemas físicos no dependen de si estos cambios de estado se refieren a uno u otro de dos sistemas de coordenadas que se encuentran en movimiento relativo de traslación uniforme.*⁹
2. *Cualquier rayo de luz se propaga en un sistema de coordenadas en "reposo" con cierta velocidad V , independientemente de si este rayo de luz ha sido emitido por un cuerpo en reposo o en movimiento.*¹⁰

El primero indica que todas las leyes físicas permanecen invariantes ante sistemas que son inerciales, sin importar si son de carácter mecánico, electromagnético u óptico. Y el segundo nos dice que si queremos medir la velocidad de la luz para un conjunto de sistemas inerciales, siempre obtendremos el mismo valor en el vacío independiente de si estos están o no en movimiento.

Dado que la velocidad de la luz medida para cualquier observador debe ser la misma, no puede existir un cuerpo material que viaje más rápido que ella, porque fácilmente se puede identificar que es el cuerpo quien se mueve aun siendo un sistema relativo.

⁹ Einstein, A. *Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento*. p. 4

¹⁰ Einstein, A. *Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento*. p. 4

Lo anterior es un punto fundamental que tiene en cuenta la Teoría Especial de la Relatividad, que no tiene en cuenta la mecánica descrita por Newton, pues dentro de esta última, era posible trabajar con velocidades infinitas y por tanto, la simultaneidad de eventos a pesar de estar separados a inmensas distancias sería absoluta al igual que su tiempo y su espacio.

En esta nueva mirada, y en palabras de Carl Sagan pronunciadas en su libro *Cosmos, el espacio y el tiempo están entrelazados*. (Sagan, 1980)

La TER por tanto, basa sus principios en la pérdida completa de las esencias absolutas del espacio y del tiempo, aunque a su vez, encuentra nuevamente un absoluto universal, la velocidad de la luz, una constante universal para la transferencia de información.

Sin embargo, a pesar de que la luz se propaga como una onda constante a través del espacio para todos los observadores, independiente de si están en reposo o en movimiento con velocidad constante, ¿realmente entienden por qué las cosas se dan así? Veamos la siguiente situación y comprobémoslo.

Si viajamos en un tren a través del espacio en un largo viaje hacia una estrella cualquiera, y encendemos los faros delanteros de nuestro magnifico tren, ¿a qué velocidad vemos que se alejan los rayos de luz de nosotros, si el tren se mueve a 10 km/h? apostarí a que saben la respuesta correcta, pues obviamente los rayos de luz se alejan de nuestro tren a una velocidad C ; pero, si el tren se mueve a una velocidad de $0.5 C$, es decir, a la mitad de la velocidad de la luz ¿a qué velocidad se alejarían los rayos de luz de nuestro tren?, si el tren se moviera a $0.99 C$, es decir, a

una velocidad muy cercana a C , sin llegar a ser C ¿a qué velocidad se alejarían los rayos de luz de nuestro tren? Tómense un tiempo para pensarlo y luego si respondan.

Podríamos responder que la información presentada hasta el momento en este documento nos dice que los rayos de luz deberían alejarse a una velocidad C de nosotros, así mismo cualquier observador que se encuentre en reposo respecto a nosotros también encontrará que la velocidad a la que se propaga la luz en el espacio sigue siendo la velocidad C . Claro está, esta información es la que yo he tratado de dejar sumergida en el libro, pero, ¿se lo pueden imaginar?

Analícemos más detalladamente la situación y agreguemos a nuestro fiel y siempre presente observador externo que se encuentra en reposo respecto a nosotros.

El tren se mueve a $0.9 C$, en un momento dado enciende las luces y luego el observador nos puede ver desplazándonos por el espacio. Hasta acá todo en orden, ¿verdad? Si analizamos estos eventos desde nuestra experiencia inicial, antes de empezar a leer el libro, diríamos que el tren siempre se moverá a $0.9 C$ y la luz se moverá a $1.9 C$ respecto al observador en reposo, pero a C respecto a nosotros que estamos en el tren, tratando el evento en cuestión como si se tratara del movimiento de dos objetos en tierra, por ejemplo, una moto que avanza en un tren que también se desplaza.

Cuando nos sumergimos en el mundo de las ondas, encontramos que esta adición de velocidades no se da si es la fuente o el receptor quien se mueve, pero si

el medio se llega a desplazar, entonces si podemos hacer la suma de velocidades. Por tanto, dado que no existe el movimiento del medio en la experiencia, argumentamos que la velocidad de la onda no depende ni de la velocidad de la fuente ni de la velocidad del receptor, por tanto, podríamos pensar que la velocidad medida por el observador será que nos movemos a $0.9 C$ y que la luz se propaga en el espacio a la velocidad C , mientras que nosotros veríamos que los rayos de luz se alejan de nosotros a $0.1 C$ contradiciendo así el resultado negativo que obtuvieron en el experimento de MM además de indicar que realmente mi tren es quien se mueve y no que es el observador quien se nos acerca.

Entonces, lo que propone la TER, es que el observador calcula nuestra velocidad y determinar que es $0.9 C$, pero además notará que la velocidad de la luz efectivamente es C respecto a él y así mismo nosotros encontraremos que la luz se aleja de nosotros a exactamente la misma velocidad C . ¿Cómo es posible que la propagación se aleje a la misma velocidad C respecto a nosotros, y que esta sea exactamente la misma velocidad C con que se acerca y aleja del observador que esta estacionario, si nosotros nos movemos respecto al observador inmóvil?

3.2.2. Análisis introductorio

Basados en los dos postulados de la TER, encontramos que efectivamente el último planteamiento mencionado anteriormente corresponde con la solución correcta pues respeta ambos postulados, sin embargo, el análisis desarrollado parece estar en desacuerdo con nuestro sentido común y nuestro pensamiento clásico.

Analícemos detalladamente el enunciado desde su planteamiento:

Si viajamos en un tren a través del espacio en un largo viaje hacia una estrella cualquiera, y encendemos los faros delanteros de nuestro magnífico tren, ¿a qué velocidad vemos que se alejan los pulsos de luz de nosotros, si la nave se mueve a 10 km/h? apuesto a que esta se la saben, pues obviamente los pulsos de luz se alejan de nuestro tren a una velocidad C , pero, si el tren se mueve a una velocidad de $0.5 C$, ¿a qué velocidad se alejarían los pulsos de luz de nuestro tren?, si el tren se moviera a $0.99 C$, ¿a qué velocidad se alejarían los pulsos de luz de nuestro tren? Tómense un tiempo para pensarlo y luego si respondan.

¿Por qué cuando decimos que el tren se desplaza a 10 km/h, nos resulta más fácil comprender lo que ocurre y decir la velocidad con que se propagan los pulsos, que cuando hablamos de velocidad de $0.5 C$, o de unos $0.99 C$?

Antes de responder, recordemos el único análisis al que no le pudimos dar una explicación “razonable” desde nuestro sentido común, pero que respeta la TER.

Entonces lo que propone la TER, es que el observador calcula nuestra velocidad y determina que es $0.5 C$, o $0.99 C$ si nos ubicamos en la segunda experiencia, pero además notará que la velocidad de la luz efectivamente es C respecto a él y así mismo nosotros encontraremos que la luz se aleja de nosotros a exactamente a la misma velocidad C .

¿Cómo es posible que los pulsos de luz se alejen a la misma velocidad C respecto a nosotros, y que ésta sea exactamente la misma velocidad C con que se

acerca y aleja del observador que está estacionario, si nosotros nos movemos respecto al observador inmóvil?

Considero que la dificultad inicial que encontramos en la solución que propone la TER, inicialmente se debe a las magnitudes de las velocidades. Cuando hablamos de velocidades muy pequeñas nos sentimos en un área de confort y al igual que lo que ocurre en las ondas mecánicas decimos que su velocidad con que se propaga nada tiene que ver con el movimiento de la fuente, debido a que la velocidad de la fuente o del receptor es muy pequeña comparada con la velocidad con que se propaga el pulso de la onda; pero a medida que aumentamos la velocidad de la fuente o del observador, salimos de esa área de confort y por tanto empezamos a dudar lo que nos dice la teoría poniendo por encima lo que para nosotros es correcto. (Ver Anexo 4)

Si comprendemos que la velocidad con que se propaga una onda es independiente de la velocidad de la fuente, pero aun así tenemos dificultades para comprender la argumentación que brinda la TER, entonces nos encontramos con nuestra segunda dificultad, en la cual, para nuestro actual sentido común, no existe coherencia en afirmar que sí el tren se mueve a una velocidad muy cercana a la velocidad con que se propaga la luz en el vacío, al encender un faro en este, los pulsos de luz se alejarán a exactamente la misma velocidad C del tren y del observador que permanece en reposo respecto a la estación, pues sería análogo a que un piloto a bordo de un avión supersónico que sobrepasa esta barrera, indicara que el pulso de la onda sonora siempre se aleja de él a la misma velocidad hacia adelante.

Podríamos concluir entonces dos cosas: la primera, que la teoría está equivocada, o segundo, que algo extraordinario ocurre cuando se trata de velocidades muy elevadas, cercanas a la velocidad de la luz de las cuales aún no tenemos el conocimiento para comprenderlas.

Si la primera fuera correcta, la TER hubiera muerto hace mucho, sin embargo ella aún permanece vigente, de lo cual podemos concluir que efectivamente, somos nosotros quienes aún no logramos comprender la esencia de lo que la teoría implica; razón por la cual estamos leyendo este texto, con el fin de aclarar esas razones que no nos permiten comprender lo que realmente ocurre en situaciones de esta índole.

3.2.3. El 1° postulado de la TER y la velocidad de la luz

Si analizamos postulado por postulado, considero podremos identificar dónde realmente se encuentra la dificultad de comprender lo que realmente ocurre, encontrar ese punto que no nos deja mirar más allá de lo evidente.

Iniciemos el análisis del primer postulado en palabras del escritor y divulgador científico estadounidense Carl Sagan:

Las leyes de la naturaleza han de ser idénticas con independencia de quien las describa. (Sagan, 1980. PDF, p. 201)

El primer postulado nos dice que las leyes de la naturaleza nunca varían y que son completamente independientes del sistema sobre el cual nos ubiquemos, analicemos y desarrollemos, siempre y cuando sean inerciales. Si un mismo experimento se desarrolla en diferentes sistemas inerciales, siempre obtendremos el

mismo resultado para cada uno de ellos, ya que las leyes de la naturaleza son invariantes.

Imaginen por ejemplo, una situación en la cual se encuentran muchísimos sistemas de referencia inerciales y ubíquense en uno de ellos. Antes que nada, imaginen como verían la situación. Debido a que estamos en un sistema inercial, muy seguramente sentiremos que estamos en reposo ante un mar de trenes que vienen y van pero siempre de manera constante.

Supongamos además, que en todos los sistemas nos ponemos de acuerdo por medio de algún medio de comunicación para realizar un experimento en común: el movimiento de un cuerpo que es lanzado verticalmente hacia arriba que luego cae en caída libre.

Después de realizado el experimento, todos los trenes se comunican nuevamente para comparar sus resultados. Si en todos los trenes el experimento se desarrolló con las mismas condiciones, todos los resultados analizados serán exactamente los mismos.

Lo anterior es lo que describe el primer postulado, que todas las leyes naturales no deben variar en sistemas que se encuentran en movimiento con velocidad constante o en reposo, y por tanto, en todos es posible desarrollar el mismo análisis porque todos se resguardan bajo las mismas leyes, y por tanto desde ellos se pueden desarrollar los mismos análisis a una misma experiencia, aun cuando se puede observar que los otros sistemas se mueven con velocidad constante.

Por el contrario, si todos empezaran la experiencia en condiciones diferentes, como por ejemplo una mayor velocidad hacia arriba o usar un objeto de mayor masa, los resultados serán diferentes pero la forma como analizan, calculan y hallan el resultado de por ejemplo, hallar la altura máxima, o el tiempo de vuelo, será exactamente la misma en cada una de ellas.

Todos estos experimentos respetarán las leyes y la forma como evolucionan los fenómenos físicos independiente de sí los sistemas inerciales están en reposo o en movimiento unos respecto a los otros.

La comprensión de este postulado no presenta mayor dificultad, y es fácilmente aplicable a los eventos cotidianos, incluso, nos permite comprender, hasta cierto punto, lo que ocurre en la situación problema con la que iniciamos este capítulo. Veamos por qué:

Si analizamos la situación y la conclusión, encontramos que la respuesta debe ser así para que todo lo dicho anteriormente tenga sentido. Recordemos que encontrarnos en un sistema inercial, hace completamente análogas dos situaciones aparentemente diferentes, el reposo respecto a otro sistema inercial o el movimiento uniforme respecto a éste. Esto quiere decir que siempre que permanezcamos al interior de un sistema inercial, podemos pensar que estamos en reposo.

Recordando lo anterior, una experiencia que tiene origen en un sistema inercial, siempre respetará las leyes de la naturaleza y se analizará de igual forma sin importar si este está en movimiento uniformemente o en reposo respecto a otros,

pues sentiremos que es este sistema quien permanece en reposo mientras que los otros se mueven constantemente.

Si nos encontramos en un sistema inercial y encendemos un faro de luz, observamos que estos pulsos se alejarán de nosotros a exactamente la velocidad C . Si desarrollamos la misma situación en la cual se encuentran muchísimos sistemas inerciales y nos ubicáramos en uno de ellos pero decidimos que la experiencia a desarrollar en común será la de medir a qué velocidad se alejan los pulsos de luz de nuestros respectivos sistemas inerciales, encontraremos que todos indicamos que los pulsos de luz se alejarán a exactamente la misma velocidad C , independiente de si para nosotros, ellos están en movimiento o si permanecen en reposo, porque para ellos, muy posiblemente yo sea el que esté en movimiento respecto a ellos.

3.2.4. Determinación de la velocidad de la luz para sistemas vistos en movimiento

No existe diferencia alguna entre el reposo y un movimiento con velocidad constante y por tanto, las experiencias con ondas electromagnéticas deben ser iguales en ambos estados, pues de no ser así, encontraríamos diferencias en las mediciones y como consecuencia se podría identificar cuales sistemas inerciales se mueven, ya que aquellos que permanezcan en reposo, encontrarán la medida exacta de C .

De acuerdo a todo lo anterior, la conclusión descrita para la situación problema que estamos analizando tendría todo el sentido, veamos con detenimiento la conclusión y miremos por qué:

Entonces lo que propone la TER, es que el observador calcula nuestra velocidad y determina que es $0.99 C$, pero además notará que la velocidad de la luz efectivamente es C respecto a él y así mismo nosotros encontraremos que la luz se aleja de nosotros a exactamente la misma velocidad C .

A pesar de que nos movemos respecto al observador, la luz viaja a exactamente la misma velocidad para ambos ya que ambos somos sistemas inerciales. No habría diferencia en decir desde el interior del tren, que es el observador quien se nos acerca mientras que nosotros lanzamos un pulso de luz que por supuesto se alejará de nosotros a una velocidad C , a decir que para el observador nosotros somos quienes nos acercamos lanzando un pulso de luz que por supuesto viajará a la misma velocidad C .

Si encontráramos que la velocidad calculada por cada uno es diferente, significaría que las leyes para analizar la propagación de la luz, serían diferentes para alguno de los dos observadores obligándoles así a buscar una nueva alternativa que satisfaga la medida diferente.

Sin embargo, el primer postulado nos dice cómo deben concluir las cosas, por lo cual no se presenta una mayor dificultad en su comprensión, pero es el segundo postulado quien nos dice cómo y por qué ocurren las cosas, lo cual describe una gran complejidad y un fuerte choque con nuestro sentido común.

El Segundo postulado, nuevamente en palabras de Carl Sagan, dice:

La luz (reflejada o emitida) por un objeto se desplaza a idéntica velocidad tanto si el objeto se mueve como si está estacionario: *No sumarás tu velocidad a la*

velocidad de la luz. Además, ningún objeto material puede desplazarse a velocidad superior a la de la luz: No te desplazarás a la velocidad de la luz ni a velocidad superior. (Sagan, 1980. PDF, p. 200)

Este postulado está en concordancia con el primer postulado, pues recalca que las leyes de la naturaleza no dependen ni del movimiento ni de la ubicación del observador; en este caso, se refiere estrictamente a una sola: la velocidad de la luz en el vacío es la misma en todas las direcciones; pero además de esto, permite poner sobre la mesa la explicación que permite comprender lo que ocurre al interior de la TER.

Considero que lo realmente importante cuando hablamos del segundo postulado, debe localizarse en el análisis del movimiento de la fuente respecto al observador y la velocidad de la luz C , que calculan tanto el observador como los que nos encontramos en el tren independiente de su movimiento relativo.

El análisis más fácil de desarrollar se da en los sistemas en los que se calcula la velocidad de la luz desde su mismo sistema, el cual es considerado como un sistema en reposo respecto a otros sistemas que consideramos están en movimiento rectilíneo uniforme, ya sea el observador o los que estamos al interior del tren. Independientemente de a cuál de los dos sistemas hagamos referencia, en ambos se estaría respetando la propiedad de las ondas que dice que su velocidad no depende de la velocidad de la fuente; dado que la luz se puede propagar con una velocidad constante C por el vacío sin necesidad de un medio, la velocidad con que se acerca o se aleja del sistema que se considera está en reposo, será la velocidad C en todas las direcciones emitidas.

Pero si ahora ubicados en ese sistema en reposo calculamos la velocidad con que el rayo de luz se acerca o aleja de un sistema en movimiento, encontraremos que esa velocidad con que se aleja ese rayo de ese sistema será diferente al valor de C pero nunca mayor a esta. Más sin embargo si desde el sistema en reposo se pudieran comunicar con las personas que se encuentran en el sistema en movimiento, y se les preguntara a qué velocidad se alejan los rayos de luz de sus sistema, su respuesta sería que los rayos se alejan de ellos a exactamente la velocidad C y que es su sistema quien se mueve hacia ellos, en dirección contraria de los rayos de luz. Ahora bien, ¿Cómo podría entender esto el personaje que se encuentra en el sistema en reposo, respecto a los que él ve están en movimiento?

Para el observador en reposo, el tren tiene una velocidad relativa a los rayos de luz propagados por él mismo, debido a que se desplaza a una alta velocidad y en el mismo sentido en que se propagan las ondas.

Si el tren se mueve a una velocidad relativa de $0.8 C$ respecto al observador y envía un rayo de luz cada segundo, él encontrará que los rayos de luz emitidos por el tren no se alejan a exactamente la velocidad de la luz de nuestro tren, pues este avanza en el mismo sentido en el que se propagan los rayos de luz; sin embargo, si lograrse comunicarse con nosotros para preguntarnos acerca de esta situación, le responderíamos que los rayos de luz se alejan de nosotros a exactamente la velocidad C y es a él a quien los rayos se acercan a una velocidad diferente e inferior a C , dado que él se acerca constantemente en sentido contrario al que se propagan las ondas.

¿Cómo es posible que el observador calcule que la luz se aleja del tren a una velocidad menor a C , y que nosotros al interior del tren, manifestemos que esta se aleja de nosotros a velocidad C ?

3.2.5. Dilatación del tiempo, contracción de la longitud, suma de velocidades relativistas, efecto Doppler relativista y el 2° postulado

La respuesta a esta problemática se encuentra inmersa dentro de la misma Teoría, en algo llamado dilatación del tiempo, contracción de la longitud, suma de velocidades relativistas y el efecto Doppler relativista.

Se podría responder basado solo en el primer postulado, pues todos debemos calcular que la velocidad con que se aleja o acerca a nosotros un pulso de luz es siempre la velocidad C , respetando así la invariancia de las leyes físicas; sin embargo, sin llegar a responder esta pregunta para satisfacer un postulado, su desarrollo puede llegar a ser comprendido al considerar dos aspectos que a primera vista, parecen que salen de una película de ciencia ficción y que son consecuencias directas del segundo postulado.

La explicación que hallará el observador para que ambas situaciones se logren dar sin llegar a paradojas, se justifica en los fenómenos relativistas de la dilatación en el tiempo y la contracción de longitud del tren, que son vistos en el sistema de movimiento, desde su sistema en reposo.

Cuando hablamos de la dilatación del tiempo, nos referimos al fenómeno del tiempo que se establece dentro de la TER, que contradice los argumentos que da la

mecánica clásica al tiempo, los cuales aseguran que existe un solo tiempo universal y absoluto, diciendo que por el contrario, cada sistema posee un propio reloj interno que se verá afectado según su velocidad de desplazamiento, perdiendo así el carácter absoluto impuesto por la mecánica clásica.

Sin embargo, es necesario indicar que la afectación de dicho tiempo interno no es notable para aquellos miembros que se encuentran al interior del sistema que se desplaza, sino que es notado por los observadores externos que observan su movimiento; en otras palabras, sólo se puede determinar su existencia cuando se comparan los tiempos internos de sistemas en movimiento relativo.

Dado que en la TER, y en palabras de Carl Sagan, *el tiempo y el espacio están entrelazados* (Sagan, 1980), si el tiempo sufre algún cambio en el sistema en movimiento, también varía su sentido del espacio.

La contracción de la longitud, consiste en el efecto de contracción de los cuerpos en el sentido del movimiento con el cual se desplacen. Esta contracción de la longitud, ya había sido expuesta años atrás por el físico y matemático Antoon H. Lorentz para explicar el fallido resultado del experimento de Michelson-.Morley (experimento de MM) (véase Anexo 3).

Para el resultado del experimento de M.M, Lorentz estableció lo siguiente:

El brazo del aparato que se está moviendo paralelamente al movimiento a través del éter se contrae en un factor $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ y compensa así exactamente el desplazamiento esperado. Esta explicación, la llamada contracción de Lorentz-Fitzgerald. Si todas las fuerzas que mantienen juntos los átomos del aparato fuesen

de naturaleza eléctrica, debería esperarse un tal cambio en la fuerza y, por consiguiente, en la longitud del brazo. (Smith, 1969, p. 37)

De esta forma se afirma que si un sistema se mueve en determinada dirección con velocidad constante respecto a un observador en reposo, su longitud se verá contraída en el mismo sentido del movimiento. Por ejemplo, si un tren en reposo tiene una cierta longitud, cuando un observador en un sistema inercial, observa que cuando este se desplaza a una velocidad cercana a la velocidad de la luz, su longitud es menor a la calculada que cuando el tren permanecía en reposo respecto al observador.

El experimento de MM confirma la contracción de la longitud de un cuerpo que se mueve y el experimento de Hafele y Keating¹¹ confirman la dilatación del tiempo, pero con muy poco reconocimiento por parte de la población en general.

Partiendo de la explicación dada tanto para la dilatación del tiempo como para la contracción de la longitud, es posible darle sentido al interrogante planteado en la situación que se ha venido desarrollando a lo largo del capítulo, veamos por qué.

Para comenzar, recordaremos y luego analizaremos parte por parte la situación planteada:

En una primera parte, podemos afirmar lo siguiente:

¹¹ En el 1971 dos físico americanos, Hafele and Keating, llevaron a cabo un experimento para comprobar la dilatación del tiempo predicha por la teoría de la relatividad. Compararon los tiempos transcurridos durante un viaje alrededor de la tierra en un avión comercial, medido por un reloj atómico en la nave y otro en tierra, en el observatorio naval de Washington. Los cálculos confirmaron dentro de un marco de error aceptable la predicción de la teoría de la relatividad. (Velez, 2008, p. 83)

El análisis más fácil de desarrollar se da en los sistemas en los que al calcular la velocidad de la luz son considerados como sistemas en reposo, consideración que se puede hacer a cualquier sistema inercial; en el caso que hemos estado analizando al sistema del observador o del tren.

Encontramos que lo anterior hace referencia a que para un sistema inercial, el movimiento constante es lo mismo a estar en reposo, no existe distinción entre ambos estados si se analizan desde su marco local. Por tanto, si se desarrolla una experiencia en un sistema en reposo relativo respecto a un sistema inercial y luego se desarrolla esa misma experiencia en un sistema con velocidad constante relativa a dicho sistema, ya que ambos son inerciales, se obtendrán los mismos resultados pues el segundo, es análogo a un sistema en reposo. En términos generales, si desarrollamos una experiencia en un sistema inercial, se deben obtener los mismos resultados si se desarrolla esa misma experiencia en otro sistema inercial, analizados cada uno desde su respectivo sistema inercial. En consecuencia a lo anterior, si en un sistema inercial, independiente de si está en reposo o en velocidad constante, se hace un experimento y se calcula que la velocidad de la luz es C , en otro sistema inercial, independiente de si está en reposo o en velocidad constante, analizado desde su interior, encontrará que esa velocidad también será C , razón por la que es más fácil desarrollar el análisis desde los mismos sistemas.

Todo lo anterior queda resumido en el primer postulado de la teoría de la relatividad.

En una segunda parte:

Independientemente de a cuál de los dos sistemas hagamos referencia, en ambos se estaría respetando la propiedad de las ondas que dice que la velocidad de las ondas no depende de la velocidad de la fuente; dado que la luz se puede propagar con una velocidad constante C por el vacío sin necesidad de un medio, la velocidad con que se acerca o se aleja del sistema que se considera está en reposo, será la velocidad C en todas las direcciones emitidas.

Aunque lo afirmado anteriormente cumple con lo dicho por la propiedad de las ondas, que la velocidad de las ondas en general no depende de la velocidad de la fuente de la cual fueron emitidas, no se puede cometer el error de reducir el segundo postulado de la TER a dicha propiedad.

Pues el segundo postulado, es decir la constancia de la velocidad de la luz, trae consigo implicaciones que van más allá de esta propiedad y que nunca serán encontradas en experimentos con ondas mecánicas, tal y como lo veremos en el siguiente análisis. De hecho, esta propiedad está sumergida dentro del postulado, más no es el postulado quien está sumergido en la propiedad.

En una tercera parte:

Si ahora ubicados en ese sistema en reposo calculamos la velocidad con que el pulso de luz se aleja de un sistema en movimiento, encontraremos que esa velocidad con que se aleja ese pulso de ese sistema será diferente al valor de C pero nunca mayor a esta.

Lo anterior argumenta lo que el observador detalla en la situación, para él, nuestro tren tiene una velocidad diferente de C , pero muy cercana, porque él ve que los pulsos de luz van por delante del tren; por tanto, cuando el tren enciende el faro, él ve los pulsos de luz propagarse a velocidad C y el tren moviéndose detrás de esos pulsos de luz, por lo cual si él decidiera calcular la velocidad con que se alejan del tren los pulsos emitidos por el tren, encontrará que estos nunca se alejan del tren a la velocidad de la luz sino a una velocidad inferior a C .

Tratando la cuarta parte:

Más sin embargo si desde el sistema en reposo se pudieran comunicar con las personas que se encuentran en el sistema en movimiento, y se les preguntara a qué velocidad se alejan los pulsos de luz de su sistema, su respuesta sería que los pulsos se alejan de ellos a exactamente la velocidad C y que es su sistema quien se mueve hacia ellos, en dirección contraria de los pulsos de luz.

Lo primero hace referencia al análisis desarrollado para la primera parte de la situación planteada, pues recordemos que no existe distinción entre el estado de movimiento de velocidad constante y el reposo, en sistemas inerciales; por tanto, a pesar de que el sistema en reposo observa que el sistema de movimiento se aleja o se acerca de los pulsos de luz, dependiendo su dirección, el otro sistema se considera en reposo y piensa que el anterior es quien está en movimiento respecto a ellos.

Para finalizar este análisis.

Ahora bien, ¿Cómo podría entender esta diferencia de respuestas sobre la determinación de la velocidad de la luz los personajes que se encuentran en el sistema en reposo, respecto a los que ellos ven están en movimiento?

Para responder esta inquietud es vital comprender primero, que la suma de velocidades a la cual estamos acostumbrados a manipular, no tiene cabida dentro de la teoría relativista; ya que, si se pudieran sumar de esta forma, sería posible sumar velocidades de un cuerpo cuyo resultado sobrepase al valor de la velocidad de la luz en el vacío. Si esto ocurriera así, significaría que sería posible ver el evento antes de que ocurra realmente, debido a que calcularíamos una velocidad mayor que aquella de la señal más rápida que informa sobre la ocurrencia del evento (que se refiere al tiempo mínimo que tarda la información en transmitirse del choque de luz emitido desde el evento hasta nuestros ojos), lo cual es absurdo.

Para que el mundo sea consistente desde el punto de vista lógico ha de haber una velocidad cósmica límite. De no ser así uno tendría la posibilidad de alcanzar la velocidad que deseara sumando velocidades sobre una plataforma en movimiento. (Sagan, 1980, PDF, p. 200)

Sin embargo, en el desarrollo de la teoría sí existe la posibilidad de sumar velocidades, pero no en el mismo sentido del mecanicismo clásico.

La suma relativista de velocidades, se construye de tal forma que al intentar sumar dos velocidades cercanas a C , nunca den mayor ni igual a C , por tanto el resultado sería un valor inferior a C , cumpliendo de esta forma lo dicho en el segundo postulado; por ejemplo, en la mecánica clásica, $1 + 1$ es igual a 2 ; en la relativista, $0.9 C + 0.9 C$ nunca va a dar $1.8 C$, su resultado será inferior a C , por ejemplo $0.999 C$, pero nunca mayor o igual a C .

Lo anterior ocurre debido a los efectos relativistas que se obtienen cuando se viaja a velocidades muy altas y entre más cercanas a la de la luz sus consecuencias son más notorias.

Ahora, es importante comprender que también existe un efecto Doppler para la teoría relativista, pero que este efecto a diferencia del efecto Doppler clásico, no permite establecer distinción alguna entre movimiento de la fuente o movimiento del observador.

El resultado clásico hace una distinción entre el caso en el cual la fuente es la que está moviéndose con respecto a un observador estacionario y el caso en el que el observador es el que está moviéndose con respecto a una fuente estacionaria¹².

Lo anterior pone en evidencia que los dos movimientos son fácilmente distinguibles y por tanto, no pueden ser analizados bajo las mismas condiciones, esto ocurre debido a la influencia que tiene el medio de propagación en la definición de los movimientos de la fuente o del observador, según quien permanezca en reposo respecto a dicha influencia.

La razón por la cual el resultado clásico pre-relativista distingue entre una fuente en movimiento y un observador en movimiento es que la derivación de las fórmulas presupone la existencia de un medio (el aire) que proporciona una vía de conducción a las ondas sonoras y por lo tanto proporciona una manera de detectar el reposo absoluto con respecto a dicha referencia. En este caso, el observador privilegiado será aquél que esté en reposo absoluto con respecto al aire en un día en

¹² Tomado de: Martínez, Armando (18 de marzo del 2009). La Teoría de la Relatividad. El efecto Doppler Relativista. Recuperado el 04 de febrero del 2012, de <http://teoria-de-la-relatividad.blogspot.com/>

*el que no haya viento alguno o que se esté moviendo en la misma dirección y con la misma velocidad (con respecto a la Tierra) a la cual está soplando el viento.*¹³

El efecto Doppler relativista, no permite diferenciar entre el movimiento de la fuente o el del observador debido a que no existe un medio de propagación que permite establecer dicha diferencia; y por tanto, se respeta una simetría en los análisis de los movimientos.

Supongamos que existe una fuente de onda que emite un pulso de luz cada segundo, si nosotros estuviéramos en reposo respecto a esa fuente, nos encontraríamos con un pulso de luz cada segundo, pero si nos movemos con una velocidad constante hacia la fuente de onda, encontraremos en primer lugar que la velocidad de la luz sigue siendo la misma, y en segundo lugar que la distancia temporal entre los pulsos de luz emitidos desde la fuente están separados menos tiempo; por tanto, su frecuencia aumentará, es decir, que nos encontramos con más pulsos en una misma unidad de tiempo, lo que provoca que el blanco común de la luz se desplace hacia el violeta, acorde con los espectros electromagnéticos de la luz; por el contrario, si nos alejamos de la fuente de onda a una velocidad constante, el blanco común se desplazará hacia el rojo, debido a que las ondas viajan en el mismo sentido en que viajamos, lo que quiere decir que le tomará más tiempo a la onda alcanzarnos, lo que se resume en una disminución en la frecuencia.

Hasta el momento hemos analizado lo que el observador ve, pero no hemos explicado por qué ocurre que el observador calcule una velocidad diferente para los

¹³ Tomado de: Martínez, Armando (18 de marzo del 2009). La Teoría de la Relatividad. El efecto Doppler Relativista. Recuperado el 04 de febrero del 2012, de <http://teoria-de-la-relatividad.blogspot.com/>

pulsos emitidos por el tren que se alejan del tren y los que nosotros calculamos al interior del tren.

Para aclarar más la situación, podríamos asegurar en un primer momento que los que estamos dentro del tren somos los que realmente nos movemos respecto al observador, a pesar de que en el viaje sentimos que no es así. Esto se podría asegurar si nos basamos en el hecho de que cuando nos subimos al tren en la estación, la aceleración provocada por este, no causo una “presión” hacia atrás, dicho presión es la que nos da a entender que es el tren quien está en movimiento acelerado, “presión” que se anuló cuando el tren dejó de acelerar y adquirió la velocidad del caso, retornando la sensación de reposo. Dado que en el trayecto no se ha sentido una desaceleración, es decir, una “presión” hacia adelante, consideramos que el tren aún se está desplazando a velocidad constante, y por tanto podríamos concluir que el observador es quien está en reposo.

Entonces, si el tren se desplaza con una velocidad cercana a la de la luz, ¿cómo es posible que nosotros dentro de este, calculemos que los pulsos de luz se alejan del tren a una velocidad C ?

Lo que ocurre es que nuestro tiempo se dilata y nuestra longitud se contrae en la dirección del movimiento, esto quiere decir, que una unidad de tiempo por ejemplo, un segundo, para el observador en reposo respecto a nuestro tren, no es la misma duración de tiempo para los que nos encontramos dentro del tren, ya que nuestro tiempo a causa del movimiento se ha expandido de tal forma que dicha unidad es más grande comparada con la unidad del observador externo.

Para hacer un ejemplo análogo que facilite la comprensión de lo dicho, imaginemos que tenemos dos reglas en las cuales un segundo equivale a diez centímetros. Cuando se dice que una de las reglas se ha dilatado, significa que el tamaño de la regla se ha expandido y con ella, todas sus unidades, en comparación al tamaño de la regla que está en reposo. Sin embargo, el hecho de que la regla haya expandido su tamaño respecto a la otra, no quiere decir que la regla haya crecido y que se le hayan agregado más centímetros, ella sigue siendo exactamente de diez centímetros, sino que su unidad comparada con la regla en reposo es más alargada.

Si el observador calcula que hemos tardado un minuto en recorrer una distancia cualquiera, y luego compara sus datos con los de nosotros, encontrará que para todos los que estábamos en el interior del tren, el recorrido era menor a la distancia calculada por el observador desde su sistema y que tardamos 30 segundos en recorrer toda la trayectoria desde el inicio hasta exactamente al mismo punto de llegada que el observador estipuló como llegada. Esto quiere decir que 30 segundos en el interior del tren en movimiento, equivalen a 1 minuto del sistema del observador en reposo.

En cuanto a la contracción de la longitud, la distancia que recorre un sistema que está en movimiento, siempre serán menores a las distancias medidas por observadores en reposo.

Estos dos fenómenos en conjunto, son los que nos permiten calcular que los pulsos de luz se alejan de nuestro tren a exactamente a la misma velocidad de la luz

en el vacío. Según la velocidad con que nos desplazemos, nuestro tiempo se dilatará de tal forma que en complemento con las contracciones de la longitud del recorrido, nos permita percibir que la luz siempre se propaga a una velocidad C de nosotros. Por tanto, si nos desplazamos a una velocidad muy pequeña comparada a la velocidad de la luz, los efectos de la dilatación del tiempo y la contracción de la longitud serán tan pequeños, que los pulsos de luz se alejarán del sistema a la velocidad de la luz; pero en cambio, si la velocidad con que se desplaza el sistema es extremadamente cercana a la de la velocidad de la luz, los efectos de la dilatación del tiempo y la contracción de la longitud serán tan grandes, que los pulsos de luz se siguen alejando a exactamente la misma velocidad C de ese sistema, es decir, que siempre el tiempo se dilata en complemento con la contracción de la longitud de modo que el observador en movimiento calcula que la luz se aleja de él a exactamente la misma velocidad C .

Esta situación se ubicó en un contexto en el cual se definió qué sistema se mueve respecto a quién, con el ánimo de facilitar la visualización del fenómeno que estamos analizando, sin embargo, es importante resaltar que esta misma situación se da independientemente de si se conoce quien se mueve y quien permanece en reposo.

Cabe aclarar que los efectos relativistas no son percibidos en el interior del sistema que se encuentra en movimiento, pues en su interior, todo marchará con total normalidad, efectos que si son percibidos por un observador externo a dicho sistema.

Además, la TER está construida de tal forma que cuando se manejan velocidades muy bajas comparadas a C , como por ejemplo las velocidades cotidianas que manejamos, estos efectos son imperceptibles reduciéndose así la formulación teórico-matemática de la TER a la formulación teórica predicha por la mecánica de newton, sobre la cual en el diario vivir es aplicada, sin error alguno. Es tan solo cuando se manejan velocidades tan altas que la relatividad empieza a hacerse notar.

Cabe resaltar, que a partir del primer postulado no se le puede dar sentido exactamente a todo lo visto anteriormente ni una explicación a sus efectos, porque si hubiera sido así, entonces la mecánica clásica hubiera podido darle sentido a todo lo anterior, ya que este es un principio que también se respeta en esta.

Al introducir un nuevo postulado, en el cual se resalte una velocidad límite y constante para la propagación de ondas electromagnéticas en el vacío es que se le da un nuevo sentido y relación al espacio-tiempo; todo esto en conjunto, es decir, el primer postulado, el segundo postulado y su cambio en la concepción del espacio-tiempo es lo que obligó a una redefinición de la mecánica que va más allá de las velocidades convencionales, sobrepasando los límites inclusive de nuestra imaginación.

En la TER la varilla con la cual se medirá todo será la velocidad de la luz, ya que es una constante que no varía en sistemas inerciales y por tanto si en un sistema se dilata el tiempo, es decir, se expande su unidad de medida es necesario identificar otro factor que al variar permita que la medida de la velocidad de la luz

siga siendo exactamente la misma, dicho factor será la contracción de la longitud para seguir obteniendo el valor de esa varilla.

Todo lo anterior, es el argumento explicativo que permite darle sentido e importancia al segundo postulado dentro de la teoría de la relatividad, además, de que es el causante de que estos hechos existan dentro de la teoría dándole así sentido a la misma.

Por tanto, el postulado no existe sin la teoría y la teoría no existe sin el postulado, ya que no es posible explicar el postulado sin la teoría pero así mismo no es posible explicar la teoría sin el postulado.

De esta forma y para finalizar nuestro gran trayecto hacia la comprensión del segundo postulado, pasando por la historia de la física y sus dificultades que hacen que esta sea lo que es hoy en día, mencionemos la importancia que tiene comprender el segundo postulado, el papel primordial que juega este en la comprensión de la TER, es decir, que nos abre las puertas a la comprensión de un mar de nuevas experiencias sumergidas en la Teoría Especial de la Relatividad.

IV. CONCLUSIONES

- A partir de la identificación de dificultades acerca de un tópico, y de vacíos encontrados en una investigación profunda en diferentes textos especializados acerca de los mismos, el docente puede desarrollar una herramienta que potencialice habilidades para la comprensión de dicho tópico.
- Las personas no tiene pensamientos o ideas equivocadas, pues es su forma de ver e interpretar el mundo, sin embargo, desde la mirada disciplinar, algunas de esas de esas ideas deben ser transformadas
- La herramienta principal para dar comienzo a una transformación de pensamiento dirigida a una comprensión más científica, de los fenómenos de la naturaleza debe ser la visión inicial que tienen las personas de dichos fenómenos, visión que nace de sus experiencias o acercamientos científicos, pues son estas juntos con sus antecedentes el punto de partida y de continuación para crear una conexión entre esas visiones comunes y unas más disciplinares y especializadas, conexión siempre ligada por el conocimiento y la comprensión.
- Las personas tiene ideas e interpretaciones del mundo que parten de su experiencia y de su sentido común, ideas que en su mayoría no son compartidas por las visiones disciplinares, pero que deben ser respetadas y que deben ser tenidas en cuenta en todo momento por los especialistas que desean lograr una transformación comprensible de los fenómenos que ocurren

en la naturaleza, y que les permita a las personas identificar sus vacíos conceptuales para que así puedan reorganizar ellos mismos su visión e interpretación del mundo a un nivel más avanzado y cercano al predicho por la ciencia.

- El desarrollo progresivo y coherente de temáticas que van de una de menor nivel de complejidad a una de mayor nivel de complejidad, permite crear una linealidad en los argumentos que ponen de manifiesto lo mínimo necesario que debe ser comprendido para avanzar al siguiente nivel; si esto no es así, si una parte no queda lo suficientemente clara como para ser comprendida por el lector, se seguirán generando inconformidades con temáticas posteriores, perdiendo por completo el sentido de la orientación dada.
- La comprensión de las leyes y/o principios que rigen a una teoría, permiten en primer lugar, darle sentido a lo que la teoría quiere expresar, y en segundo lugar, permite generar argumentos sólidos que van más allá de la aceptación *per se*.
- Presentar la introducción a una teoría partiendo de experiencias y analogías vivenciales permite una mayor comprensión de la misma.

V. Bibliografía

Landau, L. y Rumer, R. (1985) *Que es la teoría de la relatividad*. Moscú: Mir.

Sagan, C. (1980). *Cosmos*. España: Planeta.

Alonso, M y Finn, E.J. (1995). *La teoría de la relatividad. Física* (pp. 405-422). Estados unidos: Addison-Wesley Interamericana.

Langevin, P. (1956). *La evolución del espacio y el tiempo. Introducción a la teoría de la relatividad* (pp. 13-44). Buenos Aires: Ediciones Leviatán.

Tipler, P. A. (1993). *Relatividad. Física para la ciencia y la tecnología*, Tercera Edición, Tomo II (pp. 1099-1144). España: Reverte.

Serway, R. A. y Beichner, R.J. (2002). *Relatividad. Física para ciencias e ingeniería*, Quinta edición. Tomo II (pp. 1245-1288). México: Mcgraw-Hill Interamericana de México.

Stone Wiske, M. (1999). *La enseñanza para la comprensión*. Paidós: Buenos Aires.

León, A. P. (2002). "Una introducción formal a la enseñanza para la comprensión". Versión PDF, recuperado el 04 de marzo del 2011, de <http://www.buenanota.edu.pe/ensenanza.pdf>

Gardner, M. (1994). *The Relativity Explosion*. Salvat Editores.

Smith, J. (1969). *Introducción a la relatividad especia*. Barcelona: Reverté.

Guerrero, P. G. (2010). *Einstein: científico y filósofo*. Cali: Editorial Universidad del Valle.

Martínez, Armando (18 de marzo del 2009). *La Teoría de la Relatividad*.

Recuperado el 04 de febrero del 2012, de <http://teoria-de-la-relatividad.blogspot.com/>

Russell, B. (1978). *El ABC de la Relatividad*. Versión PDF: Digitalización: maplewhite@gmail.com. Recuperado el 21 de Junio del 2013, de http://www.bsolot.info/wp-content/uploads/2011/02/Russell_Bertrand-El_ABC_de_la_Relatividad.pdf

Einstein, A. (1998). *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*. Barcelona: ALTAYA, S.A. Versión PDF. Recuperado el 04 de marzo del 2013, de <http://academiasapereaude.com.ar/Libros/Ciencias/Fisica/Albert%20Einstein/AlbertEinsteinSobrelATeoriadeRelatividad.pdf>

Bondi, H. (1964). *Relativity & Common Sense*. London: Heinemann. Versión PDF, Recuperado el 15 de septiembre del 2012, de <https://archive.org/details/RelativityCommonSense>.

Cardenas, C. L y Botero, F. C. (2009). *Leibniz, Mach y Einstein: tres objeciones al espacio absoluto De newton*. Versión PDF, recuperado el 07 de Julio del 2013, de [http://200.21.104.25/discufilo/downloads/Discusiones10\(15\)_3.pdf](http://200.21.104.25/discufilo/downloads/Discusiones10(15)_3.pdf)

Velez, F. (2008). *Apuntes de la relatividad* 3ra versión. Universidad Pedagógica Nacional.

Bautista, G. (2011). *Lectura para el seminario de "física moderna: conocimiento y realidad*. Universidad Pedagógica Nacional

Einstein, A. (1905). *Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento*. Versión PDF, recuperada el 15 de septiembre del 2011, de http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/jcuevas/Teaching/articulo-original.pdf

VI. Anexos

Anexo 1: Es relativo

A lo largo de nuestra vida, siempre hemos permanecido sumergidos en el mar de las comparaciones, quizás no lo hayamos pensado hasta el momento, pero de todas formas lo hemos hecho. Pondremos en evidencia, que todo cuanto caracterizamos está sujeto a la comparación; pero antes, tratemos de analizar las siguientes preguntas:

¿Qué es grande?, ¿Qué es pequeño?, ¿Qué es arriba y qué es abajo?

Muy seguramente resolver estas dificultades resultan bastante incómodas si se analizan desde un único cuerpo y de forma individual; pero lo cierto es que cada característica que brindamos a los cuerpos, como alto o bajo, son representación de la comparación entre un mínimo de dos cuerpos. Por ejemplo; tratemos de analizar la siguiente pregunta; ¿un balón de fútbol es grande o pequeño? Es claro que esta pregunta carece de sentido, ya que el balón puede ser inmensamente grande comparado con el tamaño de un grano de azúcar, pero a su vez puede ser inmensamente pequeño comparado con el tamaño de la tierra. Por tanto, no tiene sentido hablar de grande o pequeño, sino tenemos otro cuerpo para comparar el cuerpo inicial.

Lo anterior describe implícitamente que todo cuanto observamos, caracterizamos y analizamos, requiere estipular las condiciones desde las cuales se puede hacer la observación, esto quiere decir que no podemos afirmar que una característica es absoluta, pues dicha afirmación depende del punto de referencia con el que se realiza la comparación.

De igual manera sucede con muchas otras propiedades de los cuerpos –como peso, color, tamaño, anchura, altura, etc.-, y es por esto, que no es posible considerar una medida o una característica como absoluta, ya que siempre dependerá, como se ha insistido bastante, de una comparación. Para aclarar un poco más este panorama, analicemos la siguiente situación:

Imaginemos que la tierra es una esfera de cristal, tan perfecta y transparente que cada punto y su opuesto se puede ver mirando al suelo cristalino. Como observadores, al mirar al suelo, vemos que al otro lado están las personas de cabeza, además de suponer que están debajo de nosotros, de lo cual concluimos que somos nosotros quienes estamos en la parte superior de la esfera.

Ahora, teniendo en cuenta el análisis desarrollado anteriormente, ubicados en la misma esfera viajamos miles de kilómetros y nos situamos en el punto opuesto en que nos encontrábamos antes de viajar, es decir, el lado opuesto al que vimos en nuestra observación inicial... ¿Qué se puede decir en ese momento respecto a nuestra ubicación?, y, ¿qué se puede decir de aquellos que observamos a través del suelo cristalino en esta nueva posición? Efectivamente, encontraremos en esta nueva posición el mismo análisis que desarrollamos inicialmente, es decir, en este

nuevo punto sentimos que nos encontramos en la parte superior de la esfera; mi lado opuesto está en la parte inferior de la misma y las personas nuevamente están de cabeza; entonces ¿Cuál de estos dos análisis a las situaciones es la correcta?

Si un compañero se situara en la posición opuesta a la que nos encontramos, este concluirá lo mismo que nosotros, es decir, nosotros estaríamos en el lado inferior de la esfera y que somos nosotros los que estamos de cabeza *respecto* a él, concluyendo que él es quien se encuentra en la parte superior de la esfera; ¿Quién está realmente arriba y quién abajo?, y ¿quién está realmente boca abajo y quién en una posición “normal”?; ambas conclusiones serán igualmente válidas.

Es este el punto donde se deja de pensar en un absoluto, y se entiende el valor y la importancia de lo relativo, es decir, que depende de donde se esté observando y con qué se esté comparando; por tanto, no hay un análisis privilegiado o absoluto.

De igual manera, esta situación se plantea para intervalos de tiempo, distancia y posición. Analicemos nuevamente dos situaciones que nos ayuden a darle sentido a lo dicho anteriormente.

En cuanto al tiempo, mencionar ideas como “se demoró menos en llegar a la meta” tiene implícitamente el proceso de comparación, ya que es evidente que se está comparando el tiempo que demoró este cuerpo con otro al cual le tomó más tiempo llegar a la meta, es decir que es necesario comparar dos tiempos para decir quien se demoró menos en llegar a un mismo punto.

De forma análoga, siempre que afirmamos “Hemos tardado dos horas en llegar a casa” estamos haciendo una comparación desde una hora 0 correspondiente a la hora en la cual salimos de nuestro punto de partida, con el tiempo que nos tomó llegar a nuestro destino.

Ahora, planteemos las hipótesis respecto a la distancia y la posición; para ello imaginemos que vamos caminando, llevamos horas y horas de una larga y confortante caminata, cuando somos interrumpidos por el teléfono celular, contestamos y nos preguntan ¿Dónde se encuentra en este momento? Es claro que la respuesta no puede ser algo como “me encuentro a 10 Km”, porque en cualquier parte del espacio se puede estar a 10 Km de cualquier punto, por lo que es necesario recurrir a un punto de referencia para darle sentido a nuestra ubicación. Por tanto la respuesta más oportuna sería, “me encuentro a 10 Km hacia el norte de la estación del tren”, o “me encuentro frente a la fábrica de Cola-Cola del centro”; en donde la estación del tren o la fábrica de Coca-Cola del centro son nuestros puntos de referencia espacial.

Por lo anterior, no podemos hablar de un solo tiempo para concluir algo, de igual forma que no podemos describir una distancia sin un punto de comparación, ya que son términos que por sí solos no nos brindarían suficiente información sobre la situación a analizar, por tanto, necesitamos un mínimo de dos informaciones para poder encontrar sentido a lo que queremos expresar.

Como análisis de este pequeño argumento, concluimos que todo cuanto analizamos, para que tenga un sentido lógico, debe ser comparado o analizado

desde otras perspectivas diferentes a la que estamos analizando, encontrando que no es absoluto, y que dependiendo con qué lo comparemos podremos obtener diversos resultados, es decir, es relativo.

Anexo 2: Movimiento Uniforme

Ya hemos discutido un poco acerca del carácter relativo del análisis de las propiedades o características de los cuerpos. Ahora, corresponde ingresar un poco al análisis físico de sistemas dinámicos. Para ello, desarrollaremos una serie de actividades descritas por medio de los experimentos Gedanken (mentales), para los cuales intentaremos determinar si el relativismo se presenta, o si a diferencia de lo planteado en el capítulo anterior, no es necesario tenerlo en cuenta para el análisis en la física.

Para nuestra primera experiencia Gedanken, necesitaremos como mínimo dos observadores, cada uno en una ubicación distinta. Cabe mencionar que cada observador corresponde a un sistema de referencia inercial diferente, lo cual permite determinar si en el sistema, el fenómeno dinámico, debe considerarse absoluto, o si definitivamente, persiste el sentido relativo.

Iniciemos estas experiencias por medio de la siguiente consideración: supongamos que estamos firmes en tierra y que saltamos verticalmente, ¿Cómo describirían y dibujarían la trayectoria de nuestro salto? Evidentemente, la trayectoria sería una recta vertical iniciando desde el suelo hasta el punto máximo al cual logramos llegar, para así retornar nuevamente a nuestro punto de partida; pero ¿Cómo describiría la trayectoria un observador que se encuentra en una ubicación diferente a la de nosotros pero que también está firme en tierra? La representación

de la trayectoria descrita por este observador es la misma línea vertical que describimos nosotros en el momento de saltar.

Agregaremos un poco de dificultad al asunto. Ahora supongamos que estamos sobre un tren de cristal que se desplaza con una rapidez constante sin cambiar de dirección: nuevamente saltamos dentro del tren de forma vertical frente a la estación donde se encuentra el otro observador... ¿Cómo describiríamos la trayectoria de nuestro salto? ¿Cómo describiría la trayectoria el observador que se encuentra ubicado en la estación?

Cuando saltamos, estamos ubicados en un punto A dentro del tren; al caer al suelo ¿caeremos más adelante, más atrás o en el mismo punto A? El primer acercamiento desde nuestro sentido común nos indica que en el momento en el que dejamos el suelo del tren, perderemos esa velocidad que nos mantenía ligado al piso, y por tanto, deberemos caer atrás del punto A, de acuerdo a la dirección en que se desplace el tren.

Antes de responder estas preguntas, vamos a analizar nuevamente el primer experimento, aquel en el cual tanto el observador como nosotros, estamos firmes en tierra donde describimos la trayectoria del salto como una recta vertical. La pregunta es, ¿por qué la descripción de ambas trayectorias resulta ser una línea recta?, la respuesta a este interrogante sería porque comúnmente consideramos que la tierra no se mueve, sin embargo, a pesar de estar firmes en tierra sentados leyendo este texto, ¿nos estamos desplazando en el espacio?, ¿Nos estamos desplazando

respecto al sol, las estrellas, la luna, etc.?, ¿El planeta Tierra está inmóvil en este gran universo?

Desde pequeños, se nos ha inculcado que no somos el centro del universo, que nuestro pequeño planeta se desplaza y gira alrededor de nuestro enorme sol; por esto, es lógico suponer que nosotros nos desplazamos con la misma velocidad de la tierra en todo momento, aunque no lo experimentemos; ya que nosotros con la tierra formamos un solo sistema, donde nuestro desplazamiento en el espacio se ve afectado por el desplazamiento de la misma.

Con lo anterior es evidente pensar que nos desplazamos en el espacio respecto a los astros, sin embargo al desarrollar la experiencia de saltar verticalmente sobre tierra firme, la trayectoria que observamos es una recta... pero ¿por qué?, ¿Por qué cuando saltamos, no caemos atrás del punto A tal como lo suponíamos inicialmente en el experimento con el tren, si la tierra también se está desplazando? La respuesta a este problema radica en comprender el denominado principio de inercia.

El principio de inercia nos indica que todo cuerpo que se presente en un estado de reposo o de movimiento uniforme (rapidez constante sobre una recta, sin curvas ni alteraciones en la trayectoria) no altera su condición a menos que un agente externo interactúe con este sistema, sin embargo, hay que tener en cuenta que no solo es el cuerpo lo que se altera, sino todo cuanto tenga contacto con dicho cuerpo (pasajeros del tren, y habitantes de la tierra), lo que en ultimas, será un sistema.

Dicho de otra manera, lo que está en reposo permanecerá en reposo hasta que alguien interactúe con él y sea capaz de causar una alteración de su estado inicial, es decir, el reposo. Todo aquello que permanezca en un movimiento rectilíneo con rapidez constante, permanecerá en ese estado, a menos que una fuerza externa, como el rozamiento por ejemplo, interactúe con el sistema.

Ahora bien, regresando a los experimentos, el sistema inercial sería el planeta tierra (agua, aire, tierra, todo lo que está dentro de ella) y nuestro cuerpo, todo funcionando como un solo sistema que se desplaza en conjunto; por ejemplo, cuando saltamos y a nuestro lado hay una piedra, viajamos horizontalmente con la misma velocidad con la que se desplaza la tierra en ese momento antes de dejar el suelo, y dado que no hay nada externo que afecte esa velocidad horizontal, aterrizaremos al lado de la misma piedra, puesto que ella también se desplaza con la misma velocidad con que se desplaza la tierra.

Se podría considerar inicialmente que las partículas del aire podrían afectar nuestro movimiento horizontal respecto a la tierra, sin embargo, recordemos que ellas hacen parte del conjunto del sistema. Además, aunque no haya un desplazamiento horizontal nuestro en el salto respecto a la tierra (es decir, que caemos sobre el mismo punto sobre el cual despegamos), sí lo hay respecto al sol, la luna y demás, es decir, que cambiamos nuestra posición en el sistema planetario, nuestro sistema solar. Más adelante se planteará un ejemplo más tangible de esta situación.

Cabe decir que no hay un desplazamiento horizontal nuestro en el salto respecto a la tierra debido a que nos movemos en conjunto (nosotros y la tierra), es decir, lo que la tierra se desplace horizontalmente durante nuestro salto, es lo mismo que nos desplazamos horizontalmente en este, aterrizando así, en el punto A respecto a la tierra. Es por todo esto que la descripción de la trayectoria desde nuestro sistema de referencia sería una recta vertical respecto al suelo.

En cuanto al observador para este primer experimento, como se encuentra firme en tierra, hace parte de nuestro único sistema, es decir del conjunto mencionado anteriormente, y por tanto todo parece suceder como si yo al realizar el salto no me desplazara horizontalmente respecto a la tierra y a él, por lo que, caería sobre el mismo punto del cual despegué.

Partiendo de lo anterior, ahora sí podemos obtener respuesta a las preguntas del segundo experimento. Cuando nos desplazamos en el tren, este al tener una velocidad constante respecto a la tierra, sería un sistema inercial parecido al del planeta tierra, y por tanto, nosotros nos desplazaríamos con esa misma velocidad constante a pesar de estar en reposo (Análogo a estar de pie y en reposo en la tierra), es decir, quietos en un mismo punto dentro del tren. Debido a lo dicho, al momento de dar un salto, horizontalmente despegamos con la velocidad exacta con la que se desplaza el tren en ese instante, más la velocidad que adquirimos de forma vertical debido al salto (Análogo a saltar en la tierra). Dado que la velocidad de desplazamiento horizontal del salto corresponde con la velocidad del tren, lo que nos desplazamos horizontalmente durante el vuelo, será lo mismo que se desplazará el tren respecto a la tierra, y por tanto, aterrizaremos en el mismo punto A dentro del

tren, siempre y cuando no varíe su velocidad, igual que lo que ocurre cuando se salta en tierra firme.

Ahora bien, ¿Cómo describiría la trayectoria el observador que se encuentra en la estación del tren? Para resolver esta pregunta, hay que considerar que existe un observador estacionario en tierra, y otro que se desplaza con un movimiento uniforme respecto a la tierra (tren como sistema inercial). Cuando saltamos dentro del tren, al ir con la velocidad del tren en todo momento, en el instante en que saltamos dentro de este, tenemos una ubicación respecto al tren y otra respecto a la tierra. Nos desplazamos horizontalmente con la velocidad que lleva el tren más la velocidad de la tierra y la velocidad vertical que adquirimos en el momento del salto, pero a su vez, el observador, a pesar de estar quieto respecto a la tierra, también se desplaza con la velocidad de desplazamiento de la misma respecto al sol, por ejemplo.

Por tanto, el observador notará que saltamos en un punto A respecto al tren, que coincide con un punto A' respecto a la tierra, y aterrizaremos en el mismo punto A del tren pero en un punto B respecto a la tierra que está más adelante de A', según la dirección en que se desplaza el tren, pero que coincide con el punto A de aterrizaje dentro del tren.

A partir de lo ya mencionado, es claro que el observador de la estación ve que la trayectoria es una parábola, puesto que nuestro salto vertical nos sube y baja, y nuestra velocidad horizontal –la del tren- nos hace cambiar de posición respecto al

suelo de la tierra horizontalmente, y conservar la posición respecto al suelo del tren, esos dos movimientos simultáneamente forman una parábola.

Todo lo anterior, nos permite dar una representación mental y una respuesta a las preguntas formuladas a partir de los experimentos desarrollados al inicio de este capítulo.

Demos inicio a nuestro nuevo experimento *Gedanken* en base a lo descrito anteriormente.

Este experimento tiene origen en un viajero que se transporta a su destino en un tren y un observador que se encuentra en otro tren y que mira con detalle el movimiento del otro medio de transporte en el cual se desplaza nuestro viajero.

Las consideraciones iniciales a analizar se simplifican en determinar quién se mueve y quién permanece en reposo. Para ello analizaremos el sistema desde los dos puntos de referencia.

Como viajeros estamos ligados a las reacciones del tren, producto de las anomalías de las vías, del rozamiento con el aire, de las vibraciones, de los cambios de velocidad, etc. Son consideraciones por medio de las cuales en el diario vivir podemos concluir fácilmente que nos encontramos en movimiento, dado que nuestras reacciones son igualmente forzadas por el tren. Por ejemplo, en el caso de la aceleración del tren, sentiremos un empujón hacia atrás; en el caso de las irregularidades de las vías, sentiremos los baches del recorrido y por consiguiente un

ligero sube y baja a lo largo del viaje, además del sonido producido por el impacto entre el tren, las vías y las corrientes de aire.

Dichas consideraciones, son las que en un primer momento nos permiten poner de manifiesto que somos nosotros los que estamos en movimiento respecto al suelo terrestre; como anexo, podemos curiosear por la ventana y detallar a algunas personas en la estación, inmóviles, perfectamente delimitadas, mientras nosotros nos acercamos y nos alejamos de las mismas.

Ahora bien, la interpretación anterior corresponde al análisis de un sistema con demasiadas variables, un sistema real; sin embargo, a lo largo del desarrollo de la física, se ha visto importante simplificar estos casos y analizar a fondo el fenómeno directamente.

Otorguemos un poco de idealismo al planteamiento anterior: supongamos ahora que nuestro viajero se transporta en un extraordinario tren, capaz de eliminar todas las complicaciones nombradas anteriormente, además de mantener siempre la misma rapidez a través de una inmensa vía recta. En este nuevo tren, ¿cómo podríamos asegurar si nos estamos moviendo o no? La respuesta más obvia sería mirar por la ventana y observar lo que ocurre afuera, árboles, personas, coches, casas, etc. que se acercan y se alejan en el mismo orden. En este punto sería fácil decir que nosotros nos movemos, porque suena complicado considerar que un árbol o una casa se muevan hacia nosotros para luego alejarse. Debido a esto, situaremos el tren en un universo homogéneo, libre de puntos de referencias externos e

implicaciones del ambiente como la brisa del aire; nuestro único punto de referencia es el conocido y amistoso observador que se encuentra en otro tren.

Ahora bien, si estamos en estas nuevas condiciones ¿Cómo podríamos asegurar si es nuestro tren el que se está moviendo respecto al tren del observador o si es el tren del observador el que se mueve respecto al nuestro? Planteemos la siguiente situación:

Nos encontramos en nuestro maravilloso tren dentro de nuestro universo homogéneo, sin tener conocimiento de si el tren está en reposo o en movimiento constante porque no hay nada más que un observador dentro de este universo ubicado también dentro de otro tren, al cual aún no hemos visto y por tanto aún no tenemos un punto de referencia con el cual ubicarnos. Cuando miramos por la ventana, notamos a lo lejos que el tren de nuestro observador se acerca poco a poco, y que luego se empieza a alejar nuevamente poco a poco. Para nosotros como viajeros, es fácil suponer que el observador está desplazándose frente a nosotros, es él el que se acerca y aleja de nosotros y no podemos concluir que somos nosotros lo que nos movemos, ya que todo en el tren está en completo reposo, no hay saltos, no hay cambios de rapidez, no hay sonido, por tanto la conclusión más obvia, es que el observador se mueve hacia nosotros y luego se aleja ¿verdad?

Ahora bien, analicemos el caso del observador. El observador no siente nada raro sobre sí mismo, trata de mirar a su alrededor pero no ve absolutamente nada para poder ubicarse. Después de un rato mira hacia adelante y observa un objeto que se acerca sigilosamente poco a poco; el tren pasa frente al observador y esté

frente a nosotros (viajeros) y luego el observador ve nuestro tren alejarse poco a poco.

Para el observador es lógico suponer que es nuestro tren el que se desplaza y pasa frente a él. Entonces... ¿Quién tiene la razón? En este punto es fácil identificar que ambos tienen la razón, porque cada uno describe la situación acorde a la sienta y la interpreta. Por un lado, es imposible determinar en un ambiente como el planteado, si somos nosotros los que nos estamos moviendo uniformemente o si estamos en reposo, ya que si el tren está en movimiento uniforme es análogo a decir en reposo ¿por qué? Porque todo cuanto tenga contacto con el tren mantendrá la misma condición inicial del tren (a menos que algo modifique el sistema o la trayectoria del tren) y si este no sufre cambio alguno, nosotros no sufriremos cambio alguno.

Para aclarar un poco esta idea, basta con imaginar que el tren que tratamos de describir, es la tierra, y cada uno de nosotros, es el viajero; ¿podrías describir un experimento en el cual se compruebe que es la tierra quien se mueve respecto al sol, o si es el sol quien se mueve respecto a la tierra?, ¿puedes describir algún experimento mecánico para indicar el movimiento de la tierra respecto al sol?, ¿alguna vez has sentido que el movimiento de la tierra te afecte? Ahora bien, hay que reconocer que el movimiento de la tierra no es un movimiento uniforme y rectilíneo, de hecho es un movimiento muy variante, pero debido a las condiciones en las que evoluciona el sistema, puede ser considerado como un sistema con velocidad uniforme debido a que no sentimos variación en su trayectoria. Por medio de esta analogía, espero se aclaren esas posibles dificultades que surgieron

producto de la interpretación de nuestro nuevo prototipo de tren y nuestro espacio homogéneo.

Ya en este punto, podrían surgir múltiples hipótesis igualmente válidas para describir el escenario anterior. Una primera, sería el caso en el cual nuestro tren se mueva hacia el observador en el otro tren a una velocidad V , mientras su tren está en reposo; una segunda, sería el caso en el cual nuestro tren está en reposo y el observador es quien se nos acerca con la misma velocidad pero contraria $-V$. Otro de los muchos casos por describir, sería nuestro tren en movimiento hacia el tren del observador a una velocidad $V/2$ y el del observador en movimiento hacia nuestro tren a una velocidad $-V/2$; en cada uno de estos casos, siempre se observará y se sentirá lo mismo ya que como explicamos antes, no hay cambio alguno que force pensar que cambiamos de posición en el tiempo.

Ya en este punto, se puede reconocer que no existe un método mecánico, una experiencia mecánica, como saltar, poner péndulos, lanzar objetos, correr, etc., que nos permita determinar si estamos en movimiento uniforme o si estamos en reposo; por tanto, no existe un marco de referencia privilegiado, es decir, un marco en el cual se identifique de forma autónoma si se desplaza a una velocidad constante rectilíneamente hacia adelante o si permanece en reposo mientras el resto de sistemas se desplazan hacia atrás con exactamente la misma velocidad.

Para argumentar un poco más esta idea, solo es necesario pensar que si los observadores de nuestro tren y los del otro realizaran alguna actividad mecánica (como lanzar una moneda hacia arriba verticalmente) y a su vez, analizaran el

recorrido de la misma para cada uno de ellos, teniendo en cuenta también el punto de vista del otro, encontrarían que ambos tienen los mismos resultados en los dos análisis, es decir, un movimiento vertical hacia arriba en el escenario local y movimiento parabólico en el escenario vecino.

Hasta el momento podemos concluir dos cosas fundamentales para la comprensión del análisis del segundo postulado de la teoría de la relatividad: primero, que todo cuanto evaluamos y observamos es relativo, que depende de algo adicional fuera de su sistema para dar cuenta de un algo; y segundo, que al identificar que no es posible reconocer si nos movemos o no en un sistema de referencia inercial, no podemos determinar un sistema de referencia privilegiado, capaz de determinar qué se mueve realmente y qué no.

Ahora bien, dentro del desarrollo del contexto sobre el cual se construyó la mecánica clásica y su idea de que todo proceso cuanto se pudiera analizar podía ser explicado por medio de las leyes y los principios que esta mirada ofrecía; se encontraron poco a poco nuevas experiencias que dificultaron esta postura, y sobre las cuales se vio la necesidad de revisar y sobrepasar esas barreras para así poder dar explicación a una cierta cantidad de experimentos no resueltos por el mecanicismo clásico. Sin embargo, antes de ingresar a esta descripción, recordemos que el análisis de lo relativo, descrito hasta el momento en el texto, sirve como introducción para argumentar que el tiempo y el espacio no son agentes absolutos, tal y como lo veremos en el siguiente capítulo.

Ya dentro de la mecánica clásica, se había estipulado que cualquier tipo de experimento mecánico que se desarrollase en un sistema de movimiento rectilíneo uniforme, se desarrollaría con normalidad en cualquier otro sistema con movimiento rectilíneo uniforme, independientemente de si estos viajan o no con las mismas velocidades, siempre y cuando ambas sean constantes, es decir, que su rapidez y dirección no varíen en el tiempo.

Para entender mejor esta idea, recurramos al ejemplo descrito por Bondi en su libro *Relativity & Common Sense*, un ejercicio sencillo de comprender tal como servir una taza de café (Bondi, 1964). Cuando deseamos servir una taza de café, el proceso es simple: Agua caliente, un poco de café, azúcar al gusto, si es necesario limpiamos la taza donde nos serviremos, sujetamos el recipiente que lo contiene y en forma de cascada dejamos que el café caiga del recipiente a nuestra taza. Un proceso sin mayor dificultad que nos permite disfrutar una deliciosa bebida para esos días de frío. Pero, ¿Qué sucederá si queremos preparar un poco de café en un avión Boeing 747 cuando nos disponemos a disfrutar de uno de sus viajes transcontinentales?

Quizás, como idea inicial y teniendo en cuenta que probablemente aún no hemos tenido la oportunidad de viajar en un avión para deducir qué sucede, recurriremos a nuestro sentido común para describir la situación, el cual inicialmente, nos indicara que no es posible servirlo, porque el avión se está desplazando con una rapidez alta comparada a nuestra posición firme en tierra con la cual preparamos y servimos el café, y que por tanto, cuando intentemos verter el café del recipiente, el café se irá hacia atrás y no caerá propiamente en nuestra taza, simplemente porque

el avión se está moviendo. Tal como lo pensábamos al inicio, cuando describíamos el salto en el tren y decíamos que caíamos atrás del punto en el que inició nuestro salto.

Sin embargo, teniendo en cuenta lo desarrollado en este capítulo, todo lo que transporta el avión se desplaza exactamente con la misma velocidad y por tanto, el café no se irá hacia atrás como originalmente pensaríamos. Este ejemplo es análogo a los ejemplos descritos en este capítulo, aunque hay que recordar y resaltar, que estos son casos donde el sistema no presenta una variación de la velocidad.

Ahora bien, ¿Qué sucederá si la velocidad del sistema uniforme varía, es decir, si el avión acelera o frena? por ejemplo, al servir nuestra taza de café, aun cuando el avión está despegando, efectivamente el café se desplazará hacia atrás de nuestra taza, debido a que el avión aumenta su rapidez hasta llegar a su velocidad fija para viajar, y el café y todo lo que este en el interior del avión, no aumenta su velocidad instantáneamente conforme aumenta la del avión, de hecho solamente tienen la misma velocidad cuando se alcanza una velocidad constante, mientras tanto, no.

Para aclarar un poco más esta idea, recurramos a un ejemplo más tangible a nuestra experiencia; transportarnos en un medio de transporte como un vehículo. Cuando un vehículo está a punto de iniciar el recorrido, este y los que estén dentro de él permanecen quietos respecto al suelo; luego procede a acelerar; cuanto más acelere el vehículo, más se sentirá una pequeña “presión” hacia atrás, que nos oprime contra el asiento, producto del constante cambio de rapidez del vehículo – en

el caso de verter café en un avión que está despegando, el café se irá hacia atrás, tal como nosotros lo hacemos en el vehículo en el momento de la aceleración.

La diferencia es que en el vehículo, las sillas nos mantienen en un mismo punto, pero se genera la “presión” hacia la silla, al contrario de verter café, que no tiene nada que la mantenga en su lugar en el proceso de caída del recipiente a la taza-, y seguirá sintiéndose de esta manera hasta que el vehículo llegue a la velocidad deseada o hasta que alcance su máxima velocidad. Después de eso sentiremos que la “presión” se hace nula y todo vuelve a la normalidad, tal como si estuviéramos de pie en tierra firme, solo que nos desplazaríamos a la velocidad del coche. Sin embargo, a pesar de que el vehículo tenga una rapidez, nosotros aun así podemos pasar un objeto, inclusive lanzarlo, tomar agua, recoger algo, dormir, etc., con la misma facilidad con la que lo hacemos estando con los pies en la tierra.

Esto se observa en cualquier sistema que se desplace con una velocidad constante como en un tren, en un avión, inclusive en el planeta tierra. Pero esto ¿por qué se debe? Porque como ya se ha mencionado, todo cuanto esté dentro del vehículo y desde que no exista nada externo que afecte el sistema interno – Como una ventana abierta o el cambio brusco de dirección- es un movimiento rectilíneo uniforme, tal y como el caso del planeta tierra –Aunque esta gire y rote, en estos movimientos los cambios de velocidad experimentados son muy pequeños tanto así que no modifican los fenómenos observados-. Por eso es posible servir una taza de café en un avión con la misma facilidad que servirla en tierra firme, siempre y cuando, el avión haya alcanzado su velocidad promedio de vuelo.

Retornando a la idea inicial de este capítulo, como ya se ha mencionado, el desarrollo de la mecánica clásica predispuso la idea de que la naturaleza ya podía ser descrita bajo esta perspectiva. Se consideraba que las leyes vinculadas a este mecanicismo describían completamente el análisis de los fenómenos de la naturaleza. Sin embargo, aun cuando la mecánica clásica permitió analizar y predecir gran cantidad de fenómenos de la naturaleza, ciertos eventos no pudieron ser explicados desde esta mirada, los fenómenos relacionados con el electromagnetismo. Antes de ingresar al marco del electromagnetismo, es necesario observar caminos que describan el proceso que conllevan al desarrollo de la teoría de la Relatividad y con ello, a la formulación de su segundo postulado.

Anexo 3: Ondas

Otro aporte realmente significativo acerca de la luz, es su descripción ondulatoria desarrollada por el gran físico James Clerk Maxwell en su teoría del Electromagnetismo, y Heinrich Rudolf Hertz en sus experimentos que permitieron poner en evidencia lo que argumentaba la teoría electromagnética.

Pero antes de sumergirnos un poco en el mundo de las ondas electromagnéticas, debemos tener la mayor claridad posible acerca de qué es una onda y todo lo que esto conlleva.

El ejemplo que más suele mencionarse es aquel en el cual arrojamos una piedra a un estanque lleno de agua. En esta experiencia, ¿qué podríamos decir desde nuestro conocimiento personal actual?, ¿Qué sucede en el agua?, ¿qué sucedería con una pequeña hoja que se encuentra a cierta distancia del punto en el cual impactó la piedra con el agua?

Las ideas que describimos en un primer momento de nuestras vidas ante esta situación, es que el impacto de la piedra con el agua, causa pequeñas olas que nacen en el punto de impacto y que se expanden constantemente y de forma circular hasta que desaparecen o llegan a la orilla del estanque. En cuanto a la pequeña hoja que se encuentra al interior del estanque, diríamos que las olas la arrastrarán hasta el borde del mismo, o hasta que la ola desaparezca. En otras palabras, se indica que las olas desplazarán a la hoja hacia afuera del punto de impacto.

Inicialmente, consideramos que por el hecho de que las ondas se alejen del punto donde cayó la piedra, significa que el impacto hace que el agua también se desplace hacia afuera, razón por la que indicamos que la hoja también será arrastrada. Sin embargo, si realizáramos el experimento en este momento, en vivo y en directo, encontraríamos que después del impacto de la piedra, la hoja solamente sube y baja manteniéndose en el mismo sitio. Ella nunca se alejaría del punto de impacto.

Veamos lo que es una onda con más detalle. Una onda, es una perturbación que viaja a través de un medio material. La perturbación debe ser ocasionada por una fuente que se encuentra sumergida dentro de un medio de propagación, permitiendo así que la onda, es decir, la perturbación, viaje por esta.

Entonces, ¿por qué pareciese que en el ejemplo del agua, las ondas movieran el agua de adentro hacia afuera? Analicemos el experimento desde su inicio.

Cuando la piedra no ha impactado al agua, esta permanece en un estado natural, y no es sino hasta después de que la piedra impacta el agua que se origina un desequilibrio en la misma; esto se considera como la fuente de la onda y es la causante de las perturbaciones en un medio de propagación, que en este caso es el agua; luego del impacto, vemos cómo esas perturbaciones salen radialmente desde el punto del impacto hacia afuera de este.

Como ya se mencionó, el impacto entre el agua y la piedra es lo que causa las perturbaciones y son causadas gracias a la energía que imprime la piedra sobre el agua. Recordemos que la energía no se crea ni se destruye, solo se puede

transformar en otro tipo de energía y esto es básicamente lo que ocurre. La energía del movimiento de la roca, se transforma en las perturbaciones que observamos en el agua y las olas que creemos desplazan una porción del agua, no son más que la extensión de la propagación de dicha perturbación, y por tanto, de energía.

La ola que creemos se desplaza, solo es la transferencia de energía de vecindad a vecindad del medio de propagación, algo parecido a lo que ocurre en el llamado efecto domino. En el efecto domino, la mano que causa el aparatoso movimiento de piezas que empiezan a caer, sería la fuente de propagación de la onda; la onda sería el choque continuo entre piezas y cada ficha sería la vecindad de la pieza que continúa y antecede.

En este efecto, la pieza inicial nunca llega al final del recorrido, pero sí impacta a su vecindad más próxima, la cual después del impacto, realiza la misma acción; el ciclo se repite hasta llegar al final del recorrido. Así mismo ocurre con las perturbaciones en el agua; la región impactada transfiere esa energía a la región vecina, la cual hará lo mismo con la próxima vecindad hasta que llega un punto en el cual, la energía de la perturbación se transforma en otro tipo de energía (por ejemplo, calórica) y desaparece el movimiento. Sin embargo, el Efecto Domino solo es posible realizarlo una sola vez, pues luego de que las piezas son impactadas, estas permanecen en el suelo sin retornar a su posición original, cosa que no ocurre con los medios elásticos, pues en ellas las partículas tienden a regresar a sus posición original, y es por esta razón que vemos muchas olas formarse con tan solo lanzar una piedra.

Se puede concluir entonces, que la perturbación creada a partir de una fuente, no transporta materia, solo transporta energía, lo cual quiere decir que nunca existirá un desplazamiento del medio de propagación, solo existirá un desplazamiento de la perturbación, es decir, de energía. Esta es la razón por la cual, la hoja del estanque nunca cambiará su posición, o si lo hace, al menos no será a causa de esto. La hoja simplemente oscilará dado que su superficie se encuentra oscilando.

Si quizás lo anterior no quedo completamente claro, tratemos de desarrollar la siguiente experiencia. Ubiquen sobre el suelo una cuerda, entre más larga mucho mejor. Fijen una de sus puntas de tal forma que no se pueda mover. Estiren la cuerda lo que sea posible, lo suficiente como para que quede recta, pero no tanto como para forzarla y evitar así, que ella sola se contraiga debido a la misma tensión. Tomen la punta que no esté atada, y suban y bajen la mano repetidas veces, varíen la velocidad con que suben y bajan la mano, y observen lo que ocurre en la cuerda (Traten de variar el ángulo de observación en caso de que no identifiquen nada, y siempre observen con mucha atención, pues lo que verán se desplaza rápidamente a lo largo de la cuerda; si es posible, pidan ayuda para que alguien realice el movimiento y ustedes se dediquen únicamente a observar).

Al desarrollar este experimento, se encontrarán con algo muy parecido a un arco que se desplaza a lo largo de la cuerda. Dicho arco, nunca estará por encima de la distancia a la que subieron la mano y siempre encontrarán que viaja de forma similar, a pesar de que cada vez es más pequeña hasta que llega el punto en que desaparece. A ese arco se le denomina, pulso de onda.

Si analizamos detalladamente la experiencia anterior, concluiremos que la mano actúa como la fuente de propagación de la onda, la onda que observamos, sería ese arco que se desplaza a través de la cuerda, es decir, el pulso de onda, de lo cual se confirma que es esta (la cuerda) el medio de propagación de la onda.

Como podemos observar en esta experiencia, la onda se propaga a lo largo de la cuerda, pero nunca desplaza porciones de cuerda hasta el final del recorrido, tal como suponemos ocurre en el agua. En ambos casos, lo que observamos es la energía propagarse a lo largo de sus respectivos medios. En el caso del estanque, el desequilibrio causado por el impacto de la piedra y las energías asociadas al movimiento de caída libre que hacen parte de su sistema, son las causantes de esas olas (pulsos de onda) que se propagan por el agua, que como ya lo dijimos, son la transferencia de energía de vecindad a vecindad; en el caso de la cuerda, el arco que se desplaza, proviene de la transformación de la energía del movimiento de nuestra mano, hacia la cuerda.

En conclusión, y como ya se ha mencionado anteriormente, las ondas son las perturbaciones provocadas por una fuente que se encuentra sumergida en un medio de propagación, siendo la perturbación el transporte de energía, más no de materia.

Los medios de propagación, son aquellos medios que poseen moléculas, en el caso análogo del efecto domino serían las fichas, que en presencia de una perturbación o vibración causada por una fuente, “chocan” con una ficha o vecindad para que también oscilen y así estas “choquen” de igual forma a la ficha o vecindad siguiente. Por tanto, todo lo que conocemos en nuestro mundo es un potencial medio

de propagación de ondas; desde el aire, la madera, la tierra, hasta el diamante, el oro y el hierro. Absolutamente todo es un medio de propagación para las ondas, aunque es importante resaltar que no en todos los medios es igualmente visible el efecto de la perturbación.

Así mismo, las fuentes de perturbación son todos aquellos objetos capaces de crear una vibración a un medio de propagación, de perturbar el estado natural del medio. Estas fuentes se dan desde las cuerdas vocales de nuestros cuerpos, hasta los bruscos movimientos de la corteza terrestre que forman los terremotos (La tierra sería el medio de propagación).

Hasta el momento hemos discutido acerca de las fuentes de perturbación, los medios de propagación y del cómo actúan las perturbaciones sobre estos; pero aún no hemos tratado un tema que es fundamental, un tanto fantástico y curioso al mismo tiempo: la velocidad de propagación.

Teniendo en cuenta lo que se ha dicho, demos un vistazo a otra característica fundamental de las ondas planteando la siguiente información acerca del sonido producido por nuestras voces, y trataremos de dar respuesta a una pregunta que se encuentra al final de la información dada:

Cuando hablamos, la fuente de la onda que da origen a la perturbación son las cuerdas vocales, estas al vibrar perturban el aire, es decir, el medio de propagación por el cual la perturbación viaja hasta que su energía, la que provoca los choques entre las moléculas, se transforma en otro tipo de energía, causando así que el movimiento se desvanezca. Sin embargo, antes de desvanecerse, otra persona que

se encuentre dentro del rango en el que el sonido aún es perceptible, identifica con claridad lo que quisimos pronunciar.

Para nuestro oyente y las personas en general, las vibraciones en el aire son interceptadas por nuestro órgano auditivo para luego ser procesadas y decodificadas por nuestro cerebro en fracciones de segundo; hasta acá todo en orden, pero si queremos que el mensaje llegue más rápido sin cambiar de ubicaciones, ¿Qué haríamos?

Comúnmente se suele pensar que para que una onda viaje más rápido, debemos perturbar con mayor Intensidad el medio en el cual nos encontramos, es decir, que hablando más duro o con una mayor intensidad, el sonido producido tardara menos tiempo en llegar al receptor. Sin embargo, esto no ocurre así, debido a que la velocidad de las ondas depende exclusivamente de las moléculas de las que está conformado el medio de propagación, y esto depende de qué tan cercanas se encuentren. Entre más alejadas, más tiempo tomará para una vecindad transferir la energía a la otra vecindad, así, los materiales que son más rígidos, tendrán una mayor velocidad de propagación que aquellos materiales cuyas partículas son más alejadas entre sí; por ejemplo, la velocidad del sonido en el agua es mayor que en el aire, pero a su vez, la velocidad del sonido en el acero es mucho mayor que en el agua (cuando hablamos de velocidad del sonido, hacemos referencia a la perturbación).

Dado lo anterior, la velocidad de la propagación de una onda, no depende del qué tan fuerte sea emitida desde la fuente, sino del medio sobre el cual se propague;

aunque hay que mencionar, que el hecho de que se emita con una mayor intensidad, provocará que la onda se proyecte mucho más lejos que una de menor intensidad.

Hasta el momento podemos establecer varias características de las ondas: son perturbaciones originadas por una fuente que se desplazan a través de un medio de propagación, reconociendo que la onda es la transferencia de energía entre vecindad y no de materia como se suele pensar, y que es a partir de este último y solo de este, que dependerá la velocidad de la onda. Sin embargo ¿qué pasaría con la velocidad de la onda si la fuente de perturbación se encuentra en movimiento respecto a los observadores?

Para este tipo de eventos los principios son exactamente los mismos, por lo menos para los observadores ajenos a la fuente de la propagación. Recordemos lo que se mencionó anteriormente: la velocidad de la onda depende de que tan alejadas se encuentren las moléculas del medio de propagación. De esta forma, podemos concluir que no importa si me muevo o no me muevo, la energía de la onda solo se verá modificada por el medio en que se propague y por tanto, la velocidad en un medio como el agua por ejemplo, que siempre mantiene las mismas condiciones para no alterar la disposición de las moléculas (diferencias de temperatura en un mismo medio alteran la disposición de las moléculas), siempre será la misma. La adición de velocidades, a diferencia de la dinámica de los cuerpos, no tiene jurisdicción para las ondas y sus medios de propagación.

Por tanto, no importará a qué velocidad se desplace la fuente de la onda, esta nunca será sumada a la velocidad de la perturbación. La velocidad de la propagación

se verá afectada únicamente por la disposición de las partículas, y por tanto, del medio. Sin embargo, a pesar de que la velocidad de la fuente, no afecte la velocidad de la perturbación, si afectará la frecuencia de la misma.

Cuando hablamos de frecuencia, se hace con el mismo sentido con que los médicos toman nuestra frecuencia cardiaca, que sería la cantidad de latidos del corazón en determinado tiempo, por tanto, sería la cantidad de pulsos (arcos) que se dan en determinado tiempo.

En caso de que la perturbación viaje en el mismo sentido en que se mueve la fuente, notaremos que su frecuencia es mayor a que si está en reposo, y por consiguiente notaremos, por ejemplo, en un evento de velocidad del sonido en el aire, que su sonido es más agudo ya que los frentes de onda cada vez estarán más cerca aumentando la frecuencia, es decir, el oyente escuchara en un mismo tiempo más pulsos de onda que cuando la fuente está en reposo. Si la onda y la fuente viajan en sentido contrario, se notara que el sonido es más grave, ya que los frentes de onda cada vez estarán más alejados, disminuyendo así la frecuencia, es decir, que el oyente escuchara en un mismo tiempo menos pulsos de onda que cuando la fuente está en reposo.

Para los eventos anteriores, también depende el movimiento del observador, pues si la fuente se encuentra inmóvil, y es el observador que se acerca, sería análogo a que la fuente se moviera hacia el observador, y por tanto, encontraríamos los mismos resultados. De igual forma ocurre si el observador se aleja de la misma.

Existe otro evento igualmente válido para encontrar el efecto del aumento de la frecuencia de una onda que se propaga en un medio, el movimiento del mismo medio de propagación. El movimiento del medio, hace referencia al cambio de posición respecto a otro punto, y esto es fácilmente observable en una corriente de aire o de agua. Dado que la velocidad de la onda depende del medio sobre el cual se propaga, si este se moviera respecto a la fuente o al observador que permanecen en reposo respecto a la tierra, sería análogo a que el observador o la fuente se movieran respecto al medio, o que alguno de los dos lo hiciera.

En consecuencia, una fuente de onda, inmóvil mientras que el medio se desplaza en sentido de la onda, provocará que el oyente también inmóvil, sienta la perturbación con una frecuencia mayor a que si el medio está inmóvil respecto a la fuente y al observador, caso análogo al que la fuente se acerca al observador o viceversa; pero si el medio se desplaza en sentido contrario al que se desplaza la perturbación, entonces encontraremos el caso opuesto, análogo a que una fuente que se desplaza en sentido contrario de la onda en un medio quieto respecto al observador o en el cual el observador se aleja de la fuente en un medio también en reposo. A este tipo de efecto, se le denomina efecto Doppler.

Por tanto, el efecto Doppler es la variación de la frecuencia en la propagación de una onda, producida por el movimiento relativo entre una fuente de propagación, el oyente o el medio de propagación, obteniendo un resultado específico dependiendo de quién o quienes se mueven y hacia donde se mueven.

Sin embargo, las descripciones tratadas hasta el momento, solo corresponden a un tipo de onda denominado ondas mecánicas; ondas que necesitan de un medio con propiedades mecánicas, es decir, un medio material. Existe otro tipo de ondas, denominadas ondas electromagnéticas, las cuales, parecen ser más independientes de algunas de las variables descritas a lo largo de este capítulo, pero cuya comprensión, se hace mucho más compleja y su demostración más complicada de argumentar a partir de la experiencia cotidiana, no por ello dejaré de intentar poner en evidencia experiencias que traten de poner sobre la mesa los temas tratados.

Como se mencionó al inicio de este capítulo, la prueba fundamental de que existe otro tipo de ondas de carácter electromagnético, recae sobre el físico escocés James Clerk Maxwell y el físico alemán Heinrich Rudolf Hertz, el primero por su trabajo teórico acerca de las ondas electromagnéticas, y el segundo, por su demostración experimental acerca de las ondas electromagnéticas.

Las ondas electromagnéticas, al igual que las ondas mecánicas, son perturbaciones que se propagan, sin embargo, en las ondas electromagnéticas, no hace falta de un medio de propagación mecánico para su propagación, a diferencia de las ondas mecánicas que si lo necesitan.

La teoría del electromagnetismo, afirma que un campo eléctrico que varía en el tiempo, generará un campo magnético que también variará en el tiempo pero perpendicular a este; así mismo, afirma que un campo magnético que varía en el tiempo, generara simultáneamente un campo eléctrico que también será variable en el tiempo y perpendicular a este.

Las ondas electromagnéticas, se generan a partir de la existencia de un campo magnético variable en el tiempo, o de un campo eléctrico variable en el tiempo, pero además, no solo se generan, sino que además se auto generan, debido a lo que se mencionó en el párrafo anterior.

Si un aparato eléctrico cualquiera es conectado pero no encendido, solo obtendremos el campo eléctrico uniforme en el tiempo, producto del “movimiento de electrones” que fluye de la conexión eléctrica al cable de alimentación; pero si el aparato eléctrico es encendido, dicho campo varía en el tiempo, lo que provoca que se genere el campo magnético y en últimas, se genere y autogeneré una onda electromagnética. Las ondas electromagnéticas a diferencia de las ondas mecánicas se autogeneran.

Debido a que las ondas electromagnéticas se autogeneran, pueden propagarse por el espacio sin ningún tipo de inconveniente, a una velocidad de aproximadamente 300.000Km/s. Una velocidad extremadamente alta, y hasta ahora, inalcanzable para el hombre. La luz, hace parte de este grupo selecto de ondas que se propagan a tan monstruosa velocidad.

El hecho de que las ondas electromagnéticas no necesiten de un medio mecánico para propagarse, no significa que no puedan propagarse a través de medios mecánicos.

En las ondas mecánicas, una onda que se propaga en un medio determinado y cambia a otro medio diferente, varía su velocidad en razón al medio de propagación al cual acaba de entrar. Sin embargo, su velocidad siempre tiene un

límite dictado por el medio sobre el cual se perturbe, así, si la onda retorna al medio original, la velocidad de la onda nuevamente será la inicial, sin importar que tipo de medio de propagación sea.

Las ondas electromagnéticas también se ven afectadas cuando se sumergen en un medio de propagación mecánico, pero su cambio de velocidad de propagación no es la misma con la que se propagan las ondas mecánicas que se propagan sobre el mismo medio. Las ondas mecánicas en un medio de propagación, varían su velocidad en la misma razón independiente del medio en que hayan sido propagadas, pues como recordaremos, su velocidad solo depende del medio en que se propagan.

La variación de la velocidad de las ondas electromagnéticas que se sumergen en un medio de propagación mecánico, depende de la permeabilidad eléctrica y la permeabilidad magnética, de las propiedades dieléctricas del mismo, ya que una onda electromagnética es el resultado de la propagación de un campo eléctrico y otro magnético perpendiculares entre si y variables en el tiempo.

La luz, onda electromagnética que notamos con mayor frecuencia diariamente, permite dar una idea de lo que en el párrafo anterior se quiso discutir. Cuando nos encontramos en una piscina, observamos como las cosas en el agua parecieran verse diferente a como se ven afuera del agua, como si se partiera el objeto en cuestión, además de poder obtener un ángulo de visión mayor sobre el borde de la piscina en el que nos encontramos. La razón por la que observamos lo anterior dentro del agua, es debido al cambio en la dirección en que se propaga la luz. Dicho

cambio en la dirección se debe a que la velocidad de propagación en el aire es mayor a la que se propaga en el agua.

Las ondas electromagnéticas a diferencia de las ondas mecánicas, no se pueden propagar por cualquier medio de propagación. La luz, por ejemplo, solo se puede propagar por medios de propagación cristalinos, transparentes o semitransparentes, pero nunca por medio opacos. Por esa razón, nunca podemos observarla a través de los objetos opacos, pero si a través de medios semi o transparentes.

Además de esto, podemos concluir que la luz viaja en línea recta, razón por la cual nunca podemos observar lo que hay al doblar la esquina, una pared o una puerta.

Es hora de recolectar algunas de las propiedades de las ondas electromagnéticas descritas hasta el momento:

- Se generan por la oscilación de campos magnéticos y eléctricos entre sí que varían en el tiempo.
- Se autogeneran de acuerdo a lo que expresa la teoría electromagnética debido a su variación de campos eléctricos y magnéticos.
- Dado que se autogeneran, su propagación no depende de un medio de propagación mecánico, logrando así propagarse por el espacio y por algunos medios mecánicos, a diferencia de las ondas mecánicas que solo pueden propagarse por cualquier medio mecánico.

- Tienen una sorprendente velocidad de propagación de aproximadamente unos 300.000Km/s en el vacío, es decir, en el espacio.
- La velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas se ve afectada al ingresar a un medio de propagación mecánico, disminuyendo está de acuerdo al medio en que se sumerja.
- Las ondas electromagnéticas viajan en línea recta.

Estos son los puntos descritos hasta el momento, características que nos permitirán poner en evidencia las diferencias que existen entre las onda mecánicas y electromagnéticas, pero que además, nos ubicarán en el desarrollo de lo que a partir de este momento se describirá en este libro.

Anexo 4: Acerca de las bases de la Teoría de la Relatividad Espacial

Antes del surgimiento de la Teoría de la Relatividad Especial, de la cual hablaremos más adelante, aún gobernaba la mecánica descrita por Newton, y con ello, las dificultades expuestas en el capítulo 3. Como ya se mencionó, la relatividad del movimiento para aquel entonces también era un concepto que no podía ser ignorado, pues no es posible demostrar a través de experiencias mecánicas desde el interior de un sistema inercial, si este se mueve con velocidad constante o si permanece en reposo respecto a otro observador.

Sin embargo, existen otros fenómenos que no eran posibles encasillarlos dentro de esta mecánica, y por tal razón, se les consideró como fuente para poder demostrar desde el interior de un sistema inercial, si este se mueve realmente con velocidad constante, o si en definitiva, permanece en reposo.

Cuando se demostró que la luz se comportaba como onda y que su velocidad de propagación no era infinita, sino finita a pesar de ser tan elevada comparadas con las cotidianas, los fenómenos ópticos fueron seleccionados como fenómenos apropiados para el desarrollo de experimentos que ponían en juego lo descrito en el párrafo anterior.

Los conocimientos sobre las ondas electromagnéticas eran tan nuevos, que se trató de hallar una relación entre las ondas mecánicas y ellas, y dado que las ondas mecánicas obligatoriamente necesitan de un medio para su propagación, se pensó

que igualmente lo necesitaban las electromagnéticas, dando origen a un medio de propagación diferente a los mecánicos ordinarios, sobre el cual las ondas electromagnéticas pudieran propagarse sin que se disiparan en el tiempo; a dicho medio se le dio el nombre de éter.

“El éter poseía algunas propiedades bastante notables. Parecía llenar todo el espacio. No era una sustancia mecánica en sentido ordinario, puesto que llenaba un vacío como queda probado por el paso de la luz a través del vacío más perfecto. Por consiguiente, carecía de peso. No absorbía energía alguna de la luz que pasaba por él y, por consiguiente, se le calificó de perfectamente elástico.” (Smith, 1969, p. 26)

A pesar de su extraña naturaleza, se pensó que era posible medir cambios de velocidad de la luz respecto al éter estando dentro de la tierra para así demostrar su existencia, además de poder demostrar el movimiento de la tierra respecto al éter.

La idea general era que el éter podía atravesar los cuerpos sin dificultad, lo mismo que el aire a través de un inmenso cedazo, sólo que con mayor facilidad. Si éste era el caso, entonces, la tierra en su órbita había de tener una velocidad relativa al éter. Si en un punto de su órbita llegaba a moverse exactamente con el éter, en otros puntos se movería con mucha mayor rapidez. (Russell, PDF, p. 16)

La velocidad de la luz entonces sería diferente si se hacen cálculos a favor del movimiento del éter, en contra del movimiento del éter y de forma perpendicular al movimiento relativo entre el éter y la tierra. Para ello, era necesario desarrollar el experimento en dos días diferentes del año, en el cual coincidieran sus posiciones pero de forma opuesta, así obtendrían el caso análogo en el cual un nadador nada contra la corriente y a favor de ella, obteniendo diferentes resultados a pesar de ser la misma distancia.

Ahora bien, si existe un éter-viento, es claro que en relación a un observador de la tierra, las señales luminosas parecerá que caminan más rápido con el viento que a su través, y más rápido a través del viento que contra él. (Russell, PDF, p. 16)

Por tanto, cuando la tierra se encuentre a favor del éter-viento, las ondas de luz deberían tener una velocidad mayor cuando van a favor del éter-viento, que si van en contra del mismo y así confirmar la existencia del éter debido a la diferencia de velocidades de los rayos de luz, además de medir la velocidad de la tierra respecto al mismo.

El experimento de Michelson-Morley (M.M) fue diseñado para encontrar dicha diferencia de velocidades de la luz. Después de elaborado el experimento, no se encontró ninguna diferencia en las velocidades medidas, replanteando así la necesidad de perfeccionar más el ya elaborado montaje experimental para nuevamente ponerlo a prueba. El experimento se desarrolló años después, pero desafortunadamente o afortunadamente, su resultado también fue negativo.

El resultado negativo de este experimento, puso de cabeza los planteamientos teóricos que se tenían hasta el momento en cuanto a la propagación de las ondas electromagnéticas, el éter y la supuesta variación que se esperaba encontrar por medio de los fenómenos ópticos que no permitían los fenómenos mecánicos.

El experimento arrojó un resultado como si no existiera un éter-viento, y por tanto era posible desarrollar dos explicaciones para esto, la primera consiste en que el planeta tierra realmente no se mueve respecto al éter, y por eso, nunca se obtendría un movimiento a favor o en contra que altere los cálculos de las medidas de las velocidades y la segunda, que las ondas electromagnéticas y los fenómenos ópticos, al igual que las experiencias mecánicas, obedecen el principio de la relatividad y por tanto tampoco será posible encontrar un cambio alguno.

La primera conclusión significaría que el sistema geocéntrico de la tierra sería correcto, pero los trabajos de Copérnico acerca del modelo heliocéntrico se adaptan con mayor precisión a los movimientos de los astros, además del hecho de que ha sido apoyado por muchos astrónomos y sus observaciones.

La segunda indicaba que no se puede obtener ningún cambio, porque las ondas electromagnéticas también obedecen el principio de la relatividad de los fenómenos mecánicos, es decir que por medio de ellas tampoco es posible detectar si un sistema se mueve inercialmente o si permanece en reposo, y por tanto, tendría que existir alguna relación entre la mecánica newtoniana, el electromagnetismo y la óptica.

Como ejemplo de lo anterior, desarrollamos dos experimentos, uno mecánico y otro electromagnético que pongan en evidencia lo dicho. Si lanzamos un misil en dirección este-oeste, y en el punto del impacto lanzamos un misil bajo las mismas condiciones en sentido oeste-este ¿Cuál consideran que debería correr mayor distancia si la tierra, por ejemplo se moviera en dirección este-oeste respecto al sol?, si lanzamos un rayo de luz en dirección este-oeste, y en el punto del impacto lanzamos otro rayo de luz bajo las mismas condiciones en sentido oeste-este ¿Cuál consideran deberían tener mayor velocidad si la tierra, por ejemplo se moviera en dirección este-oeste respecto al sol? Si desarrollamos la primera experiencia, no se encontraría ninguna diferencia en las distancias recorridas por los misiles, si se encontrara diferencia alguna significaría que la tierra no sería un sistema inercial, debido a que para una misma experiencia sus leyes de movimiento se verían afectadas por el movimiento de la tierra y por tanto sería un sistema privilegiado.

En cuanto a la segunda experiencia, las velocidades medidas serán exactamente las mismas, pues de no ser así, se plantearían las mismas hipótesis de la primera experiencia, las cuales conllevan a pensar que la tierra sería un sistema privilegiado, lo cual quiere decir que para cada lanzamiento del rayo deben existir diferentes leyes que describan su movimiento para que estas concuerden cada una con su resultado; dado que esto no ocurre, es lógico pensar que no existe una diferencia alguna entre lanzar un rayo de luz en diferentes sistemas inerciales, es decir, se respetan las mismas leyes para todos ellos,

La dificultad surgió cuando se intentó relacionar la mecánica con el electromagnetismo, pues las ecuaciones de Galileo, ecuaciones que permiten la transformación entre diferentes sistemas inerciales, permanecen invariantes ante la selección del observador sobre el cual nos queremos ubicar, es decir que las ecuaciones que nos describen el evento no varían si cambiamos a otro observador, razón por la cual no podemos distinguir un movimiento absoluto, pero si varían cuando se aplican a fenómenos electromagnéticos, y por tanto, sería posible encontrar un movimiento absoluto, pero como ya se dijo, el resultado negativo del experimento de M.M descarta esta posibilidad, ya que el rayo de luz del experimento no encontró diferencia alguna en los movimientos, tal como lo harían los fenómenos mecánicos.

Las teorías tal como se manifestaban en aquel entonces, eran incompatibles, aun cuando todo parecía indicar que no deberían serlo. La solución a este planteamiento se encontraba sumergida en la afirmación de que la luz también

obedece al principio de la relatividad, pero hacía falta desenmascarar todo lo que esto conlleva.

Intentemos comprender este hecho que revolucionará la forma como comprendemos el mundo actualmente.

Cuando se dice que la luz debe obedecer el principio de relatividad, nos referimos directamente a que no es posible considerarla como fenómeno que permita identificar la naturaleza del movimiento de un sistema inercial. El resultado negativo del experimento de MM lo confirma a pesar de que esta nunca fue su intención, de hecho, ellos esperaban encontrar todo lo contrario, y así demostrar el movimiento de un sistema inercial, es decir, precisar que no se encuentra en reposo sino en movimiento con velocidad constante diferente de 0.

Recordemos lo visto en el capítulo 2, y el hecho de que no nos era posible determinar si nos estamos moviendo o si estamos en reposo en un sistema inercial respecto a otro sistema inercial. Si lanzamos una pelota de un lado hacia el otro, o si saltamos en un mismo punto, siempre obtenemos el mismo valor para el mismo sistema, y aunque estos experimentos se realicen simultáneamente en dos sistemas inerciales, uno moviéndose respecto al otro, encontraríamos los mismos valores para cada sistema, y por tanto, las leyes de la física que describen estos movimientos son invariantes. Las leyes de la física son generales independientemente de donde se realicen.

Básicamente los fenómenos ópticos basados en los resultados de MM, se comportan de la misma manera. Como ya se sabe, la velocidad de la onda no

depende ni de la velocidad de la fuente, ni de la velocidad con que se mueva el observador, sino con la velocidad que permite propagar el medio. Sin embargo, al encontrar ese resultado negativo de tan famoso experimento, la idea del éter ya no era del todo un hecho teórico, y pasó a ser parte de los muchos intentos por dar razón acerca de algo, tal como ocurrió con el espacio absoluto de Newton en su mecánica. Por tanto, la idea del éter y los fenómenos ópticos se separaron completamente, dando un primer paso en la comprensión de las mismas y argumentando que la luz puede propagarse sin la necesidad de un medio.

A partir de lo anterior cabría preguntarse, ¿Su velocidad de qué depende entonces? La velocidad de estas ondas a diferencia de las mecánicas, no depende ni de la velocidad de la fuente, ni de la del observador, ni del medio de propagación, depende únicamente de la variación de los campos magnéticos y eléctricos lo que le permite así, propagarse en el vacío. Por tanto, su velocidad de propagación no depende de lo que las ondas mecánicas dependen, un medio de propagación.

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, el hecho de que la luz no necesite de un medio de propagación, no quiere decir que no pueda propagarse sobre uno, ni mucho menos quiere decir que su velocidad de propagación no se vea afectada. La sorprendente velocidad máxima de la Luz solo puede ser desarrollada cuando se propaga en el espacio, pues en presencia de un medio mecánico su velocidad disminuye, pero a pesar de que se modifica y disminuye, aún sigue siendo una velocidad extraordinariamente alta.

Pero además de lo mencionado, es más sorprendente analizar el fenómeno cuando el sistema está en movimiento. Para analizar esto, nos situaremos en un experimento Gedanken ya conocido, pero esta vez con un poco más del sabor dulce del electromagnetismo que del ya común y corriente sazón del mecanicismo clásico.

Recordemos aquella experiencia en la cual despertábamos al interior de un tren espacial en el cual no se sentía movimiento alguno o que presentaba signo alguno de que se desplazaba, en un universo completamente homogéneo y sin puntos de referencia sobre el cual poder ubicarnos, ¿Lo recuerdan, verdad? En aquella experiencia, al cabo de un rato identificábamos otro tren que se nos acercaba poco a poco, y desarrollando cálculos, podíamos concluir que su velocidad de desplazamiento era constante respecto a nosotros, es decir un sistema inercial al igual que nuestro tren. Recuerden que en aquella situación, no nos fue posible determinar quién se movía respecto a quién, pues solamente nos fue posible decir que el tren en que nos encontrábamos permanecía en reposo respecto al otro tren que se nos acerca poco a poco, pero que esto también sucedía con los pasajeros del otro tren, para ellos nosotros somos los que nos acercamos y ellos permanecían en reposo. Si recurriéramos a realizar las mismas experiencias mecánicas y pudiéramos comunicarnos entre los trenes, encontraríamos que los resultados son los mismos a pesar de pensar que es el otro quien se mueve respecto al otro.

Inicialmente la experiencia la desarrollamos bajo el supuesto de lo que en esta oportunidad analizaremos, sin embargo parece que es tan normal que en ese desarrollo no ofrecía nada a la experiencia. Para que nosotros podamos observar, es necesario que lleguen los rayos de luz provenientes de algo a nuestros ojos, por

tanto, si en algún momento podemos observar un tren, esto significa que los rayos que salen del tren llegan hasta nuestros ojos para así obtener información.

Ahora quiero que tengamos en cuenta lo anterior y supongamos que aún no hemos logrado divisar el otro tren. Respondamos la siguiente pregunta a partir de la siguiente información; si el tren enciende los faros delanteros, ¿con qué velocidad se propagarían las ondas de luz y con qué velocidad se alejarían de nuestro tren si estamos ubicados en el espacio?

Posiblemente muy adentro de su ser responderán, ¿cómo rayos sabré a qué velocidad se propaga la luz? Afortunadamente, esas mediciones ya se han desarrollado a lo largo de la historia, cada vez precisando más y más sobre cuál es el valor con que se propaga la luz en el vacío, que como ya se mencionó es de aproximadamente unos 300.000Km/s, valor que a partir de este momento llamaremos como C , pero solo cuando estemos ubicados en el vacío.

Por tanto, la respuesta a nuestra última interrogante sería que las ondas de luz se propagan a C en el espacio, y por tanto, se debe alejar de nosotros a esa misma velocidad; pero, ¿qué pasaría si encendemos los faros traseros del tren, y queremos medir nuevamente la velocidad con que se propaga la luz en el vacío y la velocidad con la que se aleja de nosotros? La respuesta será exactamente la misma.

Lo visto anteriormente no es nada nuevo, un caso más cercano y análogo se da por ejemplo cuando estamos al interior de un auto y su conductor toca el Claxon cuando permanecemos en reposo respecto a la tierra. Si deseamos medir la velocidad de propagación de la onda, obtendremos que se propaga con la velocidad

que permite el medio, es decir el aire, y por tanto, su valor será la de la velocidad del sonido en el aire, que será la misma velocidad con la que se aleje de nosotros. Hasta acá no hay mayor complejidad, ¿verdad?

Regresando a nuestro tren, y pasado un tiempo, ahora si podemos observar la luz que proviene del otro tren que se nos acerca poco a poco. ¿A qué velocidad se propagan los rayos del otro tren y a qué velocidad viajan hacia nosotros? Antes de responder a estas preguntas, retomemos el ejemplo del auto y el claxon y desarrollemos un experimento análogo.

Supongamos que ahora se nos acerca un auto que de igual forma toca su claxon, y que se nos plantean las misma preguntas, solo que esta vez sí tenemos un medio de propagación mecánico. Para responder la pregunta, debemos mirar en qué medio de propagación nos encontramos sumergidos, y dado que la velocidad de las ondas mecánicas no depende de la velocidad de la fuente, obtendremos que la velocidad con que se propagan corresponde con la velocidad del sonido en el aire, y de igual manera es la velocidad con que se nos acercarán los frentes de las ondas, aunque muy seguramente encontraremos este sonido un poco más agudo de lo normal, esto es el efecto Doppler visto y analizado brevemente en el capítulo 4.

Así mismo nos encontraremos en la situación del tren, encontrando que la respuesta es que la luz se propaga en el vacío a C , y que a esa misma velocidad se acerca a nuestro tren. En los fenómenos asociados con la luz, a diferencia de las ondas mecánicas, no se escucharán con un tono más agudo, pero si notaremos que su color blanco cotidiano no hace parte de ella, de hecho, dependiendo de la

velocidad con que se nos acerque el tren, la luz cada vez tenderá más hacia una especie de violeta debido a que su frecuencia también aumentará; y cuando se nos aleje, la luz tenderá al rojo debido a que su frecuencia disminuye. Fácil, ¿verdad? Pero la pregunta de mayor dificultad sería la siguiente, ¿A qué velocidad se propagan las ondas de luz del tren que se nos acerca y a qué velocidad se alejan de este?, ¿Cuál sería nuestra respuesta?

Si el tren se acerca hacia nosotros, es lógico que tiene una velocidad diferente de 0 respecto a nosotros; partiendo de esto, la respuesta a cuál es la velocidad con que se propaga la luz en el vacío emitida por aquel tren que se nos acerca será exactamente la misma velocidad C en el vacío, pero, y ¿la velocidad de los rayos que se alejan respecto al tren que se nos acerca? Dado que la propagación de la onda avanza en cada pulso a velocidad C , se pensaría que la velocidad con que se aleja del tren, deberá ser la resta entre la velocidad de la propagación y la velocidad del tren, de esta forma, si el tren avanza con mayor velocidad, la distancia entre el pulso de la onda y el tren, será menor, sin embargo, esto no ocurre así para las ondas electromagnéticas. Veamos por qué:

Cuando analizamos esta misma situación desde la perspectivas de las ondas mecánicas, encontramos que realmente el pulso de la onda en cuestión se alejará de la fuente de onda según la velocidad con que se desplace la fuente y el medio de propagación en que se encuentre la onda, tan es así, que incluso, existe la posibilidad en la cual, la fuente de la onda, sobrepase la velocidad de la onda y de esta manera, nunca la verá delante de ella. Cuando hablamos de aviones supersónicos, son aviones que están diseñados para viajar más rápido que la

velocidad del sonido en el aire, y por tanto, a medida que el avión acelera, notará dos cosas: primera, que la onda se propaga a exactamente la velocidad que se debería propagar, pero notará que cada vez la velocidad de la onda se propaga respecto a él con mayor velocidad, hasta el punto que la rebasa y deja de producir sonido delante de él, agrupando muchos frentes de ondas pero todas del avión. Cuando el avión pasa frente a un observador, este no sentirá ninguna onda sonora, pero al cabo de cierto tiempo sentirá un poderoso estruendo que proviene del avión. Esto ocurre porque el avión viaja más rápido que el sonido en el aire, y por tanto, pasará primero el avión y luego si los pulsos acumulados producidos por el avión.

Si el avión supersónico, mantiene una velocidad constante mayor a la velocidad del sonido, este nunca notará ni escuchará los sonidos que él mismo produce. Sin embargo, este caso también se dará si el avión permanece en reposo y es el medio de propagación, el aire, quien se mueve en sentido contrario al que se desplaza las ondas que produce el avión. En este caso, la relatividad de elección sigue siendo invariante con las leyes de la física, pues existe la libertad de elección para obtener el mismo resultado sin importar en que sistema nos ubiquemos, el del avión o el del medio.

En cuanto a las ondas electromagnéticas, no podemos hacer el mismo análisis, pues como recordaremos, en el experimento de MM, se confirmó que no existe ni el éter-viento, ni mucho menos el medio de propagación para que estas existan, y por tanto, si el tren se desplaza, ¿a qué velocidad se alejan las ondas de luz de él? La respuesta a esta pregunta esta en analizar el fenómeno en cuestión desde el otro tren y no desde el nuestro.

Si cambiamos súbitamente de tren sin tener conocimiento de dicho cambio, y nos disponemos a desarrollar el mismo análisis que en el primero, ¿encontraríamos alguna diferencia? Decir que este nuevo tren es el que se mueve ahora no tiene sentido, pues resulta que desde nuestro actual punto de vista, es el tren en el que nos encontrábamos quien se acerca hacia nosotros y no nosotros hacia ellos. Por tanto, todas las cuestiones planteadas para el primer caso, serán obtenidas de igual forma para este nuevo tren. Entonces, ¿a qué velocidad se propagarán las ondas de luz de nuestro nuevo y actual tren? Efectivamente encontraremos que también se alejan de nosotros a una velocidad C en el vacío.

De acuerdo a lo anterior cabría preguntarse, ¿por qué en las ondas mecánicas sí ocurre que la velocidad con que se alejan de la fuente varía dependiendo de la velocidad de la fuente y del medio, y en las ondas electromagnéticas no?

Como primera medida, podríamos indicar que esto se debe a que la onda no depende de un medio de propagación, a diferencia de las mecánicas, pero además, porque si no fuera así, fácilmente podríamos indicar quién se mueve realmente respecto a quien, ya que al no haber medio de propagación, no podría existir un movimiento de este como ocurre en los medios mecánicos.

En el caso de los medios mecánicos, se encuentra esa diferencia de velocidad entre la velocidad de los pulsos de onda y la velocidad de la fuente o inclusive en la del receptor, porque existe ese medio, de manera que es posible recrear esa misma conclusión haciendo variaciones al experimento, es decir, haciendo que el medio se mueva y la fuente permanezca en reposo, o que sea la fuente quien se mueva y el

medio permanezca en reposo o inclusive que ambos se muevan de tal forma que se obtenga el mismo resultado, como por ejemplo, en sentidos contrarios; de esta forma se respeta el principio de la relatividad y su invariancia en los cambios de sistemas inerciales, pues en cada uno de ellos, siempre sentiremos y obtendremos lo mismo que en los demás.

Pero si hablamos de ondas las cuales existen independientes de un medio de propagación las cosas cambian súbitamente, como ya se ha visto, y ello ocurre porque las experiencias inerciales deben permanecer invariantes a la elección del sistema analizar, no se puede reconocer si somos nosotros o los otros quienes realmente se mueven, tan solo podemos hablar desde lo que observamos, pero la observación será exactamente la misma que realicen los demás sobre nosotros y por tanto, no podemos concluir quien realmente se mueve, tan solo identificar un movimiento relativo.

Si estando en reposo obtenemos un resultado tal como el que desarrollamos para el tren en reposo y la onda de luz, ese mismo resultado lo obtendremos si permanecemos en movimiento uniforme con velocidad constante; no los podemos diferenciar. Aún sabiendo que somos nosotros quienes nos movemos porque sentimos el impulso del tren, cuando desarrollemos la experiencia, no notaremos cambio alguno que cuando la realizamos cuando el tren estaba apagado.

Es por todo lo anterior, que se menciona que la luz, tiene exactamente la misma velocidad C en el vacío para todos los observadores, sus posiciones en el

espacio o las velocidades que tengan en el momento de recibir la onda de luz, siempre y cuando, estos también sean sistemas inerciales.

Albert Einstein, determinó que los dos aspectos mencionados con mucho rigor a lo largo de este capítulo, eran suficientes para describir una nueva mecánica que permitirá relacionar todos los fenómenos físicos dentro de los sistemas inerciales, resaltando la imposibilidad de encontrar de cualquier forma algún sistema privilegiado en este tipo de sistemas.

De esta forma, Einstein describe sus dos únicos postulados para esta nueva teoría denominada, Teoría Especial de la Relatividad (TER):

1. Las leyes de acuerdo a las cuales cambian los estados de los sistemas físicos no dependen de si estos cambios de estado se refieren a uno u otro de dos sistemas de coordenadas que se encuentran en movimiento relativo de traslación uniforme.¹⁴

2. Cualquier rayo de luz se propaga en un sistema de coordenadas en "repose" con cierta velocidad V , independientemente de si este rayo de luz ha sido emitido por un cuerpo en reposo o en movimiento.¹⁵

El primero indica que todas las leyes físicas permanecen invariantes ante sistemas que son inerciales, sin importar si son de carácter mecánico, electromagnético u óptico. Y el segundo nos dice que si queremos medir la velocidad

¹⁴ Einstein, A. *Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento*. p. 4

¹⁵ Einstein, A. *Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento*. p. 4

de la luz para un conjunto de sistemas inerciales, siempre obtendremos el mismo valor en el vacío independiente de si estos están o no en movimiento.

Dado que la velocidad de la luz medida para cualquier observador debe ser la misma, no puede existir un cuerpo material que viaje más rápido que ella, porque fácilmente se puede identificar que es el cuerpo quien se mueve aún siendo un sistema relativo.

Lo anterior es un punto fundamental que tiene en cuenta la Teoría Especial de la Relatividad, que no tiene en cuenta la mecánica descrita por Newton, pues dentro de esta última, era posible trabajar con velocidades infinitas y por tanto, la simultaneidad de eventos a pesar de estar separados a inmensas distancias sería absoluta al igual que su tiempo y su espacio.

En esta nueva mirada, y en palabras de Carl Sagan pronunciadas en su libro Cosmos, el espacio y el tiempo están entrelazados.

La TER por tanto, basa sus principios en la pérdida completa de las esencias absolutas del espacio y del tiempo, aunque a su vez, encuentra nuevamente un absoluto universal, la velocidad de la luz, una constante universal para la transferencia de información.

Sin embargo, a pesar de que la luz se propaga como una onda constante a través del espacio para todos los observadores, independiente de si están en reposo o en movimiento con velocidad constante, ¿realmente entienden por qué las cosas se dan así? Veamos la siguiente situación y comprobémoslo.

Si viajamos en un tren a través del espacio en un largo viaje hacia una estrella cualquiera, y encendemos los faros delanteros de nuestro magnifico tren, ¿a qué velocidad vemos que se alejan los rayos de luz de nosotros, si la nave se mueve a 10 km/h? apuesto a que esta se la saben, pues obviamente los rayos de luz se alejan de nuestro tren a una velocidad C , pero, si el tren se mueve a una velocidad de $0.5 C$, es decir, a la mitad de la velocidad de la luz ¿a qué velocidad se alejarían los rayos de luz de nuestro tren?, si el tren se moviera a $0.99 C$, es decir, a una velocidad muy cercana a C , sin llegar a ser C ¿a qué velocidad se alejarían los rayos de luz de nuestro tren? Tómense un tiempo para pensarlo y luego si responden.

Podríamos responder que la información presentada hasta el momento en este documento nos dice que los rayos de luz deberían alejarse a una velocidad C de nosotros, así mismo cualquier observador que se encuentre en reposo respecto a nosotros también encontrará que la velocidad a la que se propaga la luz en el espacio sigue siendo la velocidad C . Claro está, esta información es la que yo he tratado de dejar sumergida en el libro, pero, ¿se lo pueden imaginar?

Analicemos más detalladamente la situación y agreguemos a nuestro fiel y siempre presente observador externo que se encuentra en reposo respecto a nosotros.

El tren se mueve a $0.5 C$, en un momento dado enciende las luces y luego el observador nos puede ver desplazándonos por el espacio. Hasta acá todo en orden, ¿verdad? Si analizamos estos eventos desde nuestra experiencia inicial, antes de empezar a leer el libro, diríamos que el tren siempre se moverá a $0.5 C$ y la luz se

moverá a $1.5 C$ respecto al observador, pero a C respecto a nosotros, tratando el evento en cuestión como si se tratara del movimiento de dos objetos en tierra, por ejemplo, una moto que avanza en un tren que también se desplaza.

Cuando nos sumergimos en el mundo de las ondas, encontramos que esta adición de velocidades no se da si es la fuente o el receptor quien se mueve, pero si el medio se llega a desplazar, entonces si podemos hacer la suma de velocidades. Por tanto, dado que no existe el movimiento del medio en la experiencia, argumentamos que la velocidad de la onda no depende ni de la velocidad de la fuente ni de la velocidad del receptor, por tanto, podríamos pensar que la velocidad medida por el observador será que nos movemos a $0.5 C$ y que la luz se propaga en el espacio a la velocidad C , mientras que nosotros veríamos que los rayos de luz se alejan de nosotros a $0.5 C$ contradiciendo así el resultado negativo que obtuvieron en el experimento de MM además de indicar que realmente mi tren es quien se mueve y no que es el observador quien se nos acerca.

Entonces lo que propone la TER, es que el observador calcula nuestra velocidad y determinar que es $0.5 C$, o $0.99 C$ si nos ubicamos en la segunda experiencia, pero además notará que la velocidad de la luz efectivamente es C respecto a él y así mismo nosotros encontraremos que la luz se aleja de nosotros a exactamente la misma velocidad C . ¿Cómo es posible que la propagación se aleje a la misma velocidad C respecto a nosotros, y que esta sea exactamente la misma velocidad C con que se acerca y aleja del observador que esta estacionario, si nosotros nos movemos respecto al observador inmóvil?

Anexo 5: Análisis de los Textos de enseñanza de la física de nivel universitario

En estos textos se revisara el capítulo de la teoría de la relatividad especial, enfocándonos en la presentación del enunciado y la explicación que brindan de este.

Enunciados del segundo postulado

Texto Tipler: *La velocidad de la luz es independiente de la velocidad de la fuente. (Alternativo) Todo observador mide el mismo valor c para la velocidad de la luz*

Texto Serway: *La constancia de la rapidez de la luz: la rapidez de la luz en el vacío tiene el mismo valor, $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$, en todos los marcos inerciales, independientes de la velocidad del observador o de la velocidad de la fuente que emite la luz.*

Texto Alonso: *La velocidad de la luz es un invariante físico, y tiene el mismo valor para todos los observadores que estén en movimiento relativo uniforme.*

Explicación del texto

Tipler:

El segundo postulado describe una propiedad común de a todas las ondas. La velocidad de una onda solo depende del medio de propagación. Se presenta de forma alternativa otro enunciado para la presentación de este: Todo observador mide el mismo valor c para la velocidad de la luz

Serway:

El segundo postulado es requerido por el primer postulado; si la velocidad de la luz no fuera la misma en todos los marcos inerciales, la medición de diferentes magnitudes de velocidad haría posible distinguir entre marcos inerciales, como resultado, se podría identificar un marco absoluto privilegiado, en contradicción con el primer postulado.

Alonso:

Los resultados negativos del experimento de Michelson y Morley llevaron a Einstein a descartar el concepto de la existencia de un éter. En su lugar propuso, como ley universal de la naturaleza que La velocidad de la luz es un invariante físico, y tiene el mismo valor para todos los observadores que estén en movimiento relativo uniforme.

Análisis de la presentación del enunciado y explicación

La idea principal es clara en los enunciados, la velocidad de la luz tiene el mismo valor para todos los observadores inerciales, independiente de la velocidad de la fuente o del observador. Sin embargo, los textos de Serway y Alonso aportan dos ideas interesantes. Por ejemplo Serway indica la propagación de la luz en el vacío, y que la rapidez en este es, $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$. Por otro lado, Alonso indica la velocidad de la luz como un invariante físico.

Dado que los textos de enseñanza se consideran una herramienta que facilita el proceso de enseñanza, se espera que estos aborden oportunamente una explicación lo suficientemente clara, para que el estudiante pueda comprender el postulado y entender cuál es la importancia de este dentro de la TER. Sin embargo dentro de los textos, solo se presenta el enunciado sin una justificación convincente. Por ejemplo, Tipler lo describe como el enunciado de una propiedad de todas las ondas, cosa que no permite entender la importancia de la luz frente a otro tipo de ondas y dentro de la teoría. Serway, por su parte, lo plantea como una exigencia del primer postulado. Al respecto surgen las siguientes preguntas ¿Acaso no son estos postulados independientes?, ¿Basta solo con el primero para fundamentar la TER?, ¿Por qué en el marco de la cosmovisión newtoniana es admisible el principio de relatividad galileano y el hecho de que la velocidad de una onda mecánica dependa

del sistema de referencia desde la cual sea determinada? Así, las aclaraciones presentadas por estos autores no consiguen guiar al estudiante a comprender lo que este postulado implica, tan solo crea una imagen la cual debemos suponer que es correcta. Por ejemplo, indicar que la luz se comporta como una onda es correcto, pero ¿Qué tipo de onda es? ¿Qué tiene de especial ese tipo de ondas?, ¿Por qué este tipo de ondas se puede propagar en el vacío? y ¿Qué es el vacío? Sin embargo, restringir la velocidad de la onda tan solo al medio de propagación, puede ser incorrecto bajo ciertas consideraciones. Por ejemplo, si analizamos el caso de una onda sonora, la velocidad de dicha onda será la misma, si se analiza respecto al aire en reposo, ¿Qué ocurrirá si en el momento en que se produce la perturbación en el aire, hay un desplazamiento de esta, debido ráfaga de viento? esta cuestión, como muchas otras que se plantearan durante el desarrollo del trabajo, quedan en un primer momento abiertas en busca de respuestas.

Para finalizar este análisis, me basare en el carácter de invariante físico que le otorga el texto de Alonso a la velocidad de luz. Si bien, la velocidad de la luz es un invariante físico al cambiar de marco de referencia, no lo es al cambiar de medio de propagación, es decir, la sorprendente velocidad que desarrolla en el vacío, no será la misma el propagarse, por ejemplo, dentro de un fluido como el agua. Al igual que este se podrían mencionar montones de medios de propagación, en los cuales se verá afectada la velocidad de la luz.

Anexo 6: Análisis del texto Histórico Filosófico.

Introducción a la relatividad de Langevin

El texto de Langevin no entra a especificar ni enunciar el segundo postulado, solo otorga “pistas” que permiten al estudiante enfocar sus estudios a determinado tema. Antes de enunciar estas “pistas”, Langevin analiza las ideas del espacio y el tiempo desde la mecánica racional y el electromagnetismo. Para desarrollar este análisis, trabaja la simultaneidad desde las dos miradas –mecánica racional y electromagnética- desarrollando experimentos mentales con base a la velocidad de transferencia de información. En la mecánica racional, dos eventos son simultáneos independientes de la distancia en la que se encuentren, es decir, su velocidad de información es infinita o instantánea, y con ello se deduce que su tiempo y espacio tienen un carácter absoluto. El electromagnetismo por otro lado y según Langevin, <<... la concepción electromagnética exige un cambio profundo de la noción de universo. Las ecuaciones del electromagnetismo implican, en su forma habitual, que una perturbación electromagnética, una onda luminosa, por ejemplo, se propaga en el vacío con la misma velocidad en todas las direcciones, igual a trescientos mil kilómetros por segundo poco más o menos>>, que mas adelante considera como velocidad de información límite. Si la velocidad de información es mayor que la velocidad de la luz, observaríamos primero el efecto seguido de la causa, lo que es absurdo.

Según el texto, << Einstein fue el primero en demostrar cómo esta consecuencia de la teoría electromagnética basta para determinar los caracteres del espacio y del tiempo exigidos por una nueva concepción del universo. De acuerdo con lo que antecede, se concibe que la velocidad de la luz deba desempeñar un papel esencial en los enunciados nuevos: es la única velocidad que se conserva cuando se pasa de un sistema de referencia...>> y de esta forma da un carácter no de espacio y tiempo, sino de un espacio-tiempo como un solo ente, además de indicar que es la única velocidad que se conserva al cambiar de marco de referencia, independiente de la velocidad de este.

Ahora bien, entrare a escribir la “pista” que arroja Langevin en su texto, <<estas leyes –leyes que rigen los fenómenos electromagnéticos- están expresadas por las ecuaciones de Maxwell y Hertz, y, cuando se las aplica a la teoría de la luz, conducen a una propagación de esta que se encuentra totalmente de acuerdo con la teoría de las ondulaciones. La ecuación de propagación hace intervenir un coeficiente constante, la velocidad V común a todas las direcciones, y si esta ecuación debe ser verificada, como lo afirma el propio principio de la relatividad, por todos los grupos de observadores, estos, siempre que hagan una elección conveniente de las unidades, verán a la luz propagarse con una misma velocidad V en todas las direcciones.>>. Las “pistas” que menciono, hace referencia a las ecuaciones de Maxwell y Hertz. Por tanto tenemos una pieza del rompecabezas que nos dirige hacia la comprensión de este segundo postulado.

A modo de resumen, Langevin analiza la necesidad de dar un nuevo sentido al espacio y tiempo, dejando a un lado el carácter absoluto que se manifiesta en la

mecánica racional. Para poder comprender este nuevo concepto de espacio-tiempo, recurre al análisis de simultaneidad, y con ello, a considerar una velocidad límite de información – velocidad de la luz-. Todo esto, analizado desde el campo del electromagnetismo y de la teoría de las ondulaciones.

Anexo 7: Análisis de los textos de divulgación

Que es la teoría de la relatividad de Landau

El texto de Landau, desde el tercer capítulo, demuestra las dificultades que presenta nuestro denominado sentido común con el progreso de la ciencia. Para trabajar el segundo postulado, desarrolla toda una experiencia que parte desde nuestras primeras ideas –tren a velocidad muy alta y rayo de luz, donde se suman o restan las velocidades- hasta la solución científica. Sin embargo, aunque intenta describir el camino desde sus inicios, se apoya y relaciona la descripción total de la teoría de la relatividad, es decir, desarrolla el camino y lo relaciona con la teoría, sin importar si en un primer momento –debido al sentido común- pareciese estar equivocada.

Landau en su texto, describe <<la velocidad de la luz no es simplemente la velocidad de propagación de un fenómeno de la naturaleza. Esta velocidad, al mismo tiempo, juega el importantísimo papel de velocidad máxima.>> que habla de la importancia de la velocidad máxima de enviar información y como esta, hace posible el desarrollo completo del primer postulado.

En síntesis el texto desarrolla desde las ideas previas –apoyándose en la teoría de la relatividad- las dificultades que se establecen en un primer momento al embarcarse en la tarea de comprender la velocidad de la luz -dificultades que nacen quizás, debido a la falta de experiencias tangibles- hasta su análisis con experimentos como el de Michelson, donde afirma que nuestro sentido común no es

correcto, y por consiguiente a desarrollar teorías que describan este tipo de fenómenos.

Cosmos de Carl Sagan

...Para poder comprender el mundo, para evitar paradojas lógicas de este tipo al desplazamos a velocidades elevadas, hay que obedecer algunas reglas, algunos mandamientos de la naturaleza. Einstein codificó estas reglas en la teoría especial de la relatividad. La luz (reflejada o emitida) por un objeto se desplaza a idéntica velocidad tanto si el objeto se mueve como si está estacionario: No sumará tu velocidad a la velocidad de la luz. Además, ningún objeto material puede desplazarse a velocidad superior a la de la luz: No te desplazarás a la velocidad de la luz ni a velocidad superior...

El texto de cosmos, basado en experimentos mentales desarrolla la construcción del pensamiento relativista contrastado con el pensamiento común, teniendo en cuenta que la velocidad de la luz es una constante universal, cuyo valor jamás podremos alcanzar por más que lo deseemos –actualmente-. No nos es posible sobrepasar esta barrera cósmica. Nos acercaremos demasiado a tal barrera, pero nunca la igualaremos. La afirmación de no adicionar velocidades, en ambos textos, la justifican por medio de la observación y el comportamiento de experimentos—por ejemplo, de aceleración de partículas- cuyos resultados tienden a la velocidad de la luz, más nunca logran desarrollar dicha velocidad, sin importar que modificaciones se planteen en el experimento.

Plantea una situación en la cual la velocidad de la luz no es muy grande, y por medio de ello da inicio al planteamiento de cómo vería el observador que iría dentro de la nave, aproximándose bastante a esta nueva velocidad de la luz, y como sería

observado por otros observadores integrando en el análisis el término longitud de onda.

Para concluir esta sección, planteare la idea principal de texto, e intentare desarrollar una pregunta, cuya respuesta espero poder dar con el tiempo, y el análisis. La velocidad de la onda luminosa, dependerá tan solo, del emisor de luz, no importa la dirección, ni su velocidad. Sin embargo, resulta interesante preguntarse, ¿Cuál será la velocidad de la luz, en un medio el cual se está desplazando?

Introducción a la relatividad especial de James H. Smith

Este libro, pretende ser una herramienta introductoria para aquellos individuos que inicien en el campo de la teoría de la relatividad especial.

Está compuesto por 14 capítulos, sin embargo, limitaremos el escrito a identificar y analizar el capítulo que se aproxima más al desarrollo de nuestro trabajo acerca de las explicaciones del segundo postulado.

Capítulo 2: Las ondas y el segundo postulado.

A modo de introducción para el capítulo, se involucra partes de las ideas trabajadas en el capítulo anterior. Dentro de este párrafo, se describe algo que llama mi atención:

“Aunque esta propiedad (las leyes de la mecánica son idénticas para observadores que se mueven uniformemente uno respecto del otro) eran ya conocidas desde hacía años, hasta que Einstein formuló el primer postulado no era obvio, en modo alguno, que la misma propiedad debía formar parte de la física en general. En efecto, se creía que un experimento óptico realizado cuidadosamente

permitiría, sin duda, determinar la velocidad de la tierra en el espacio, y en fallo de tales experimentos fue uno de los caminos principales que condujeron en último término a la teoría de la relatividad.”

En el cual, se pronuncian dos aspecto, que considero pueden ser piezas de indagación para poder desarrollar y abordar de manera segura el enunciado del segundo postulado. En primer lugar, al indicar experimento óptico, da la impresión de que este tipo de experiencias fueran ajenas a las leyes de la mecánica (en ese contexto), y segundo, la ya conocida hipótesis de que el fallo de estos experimentos ópticos, fueron la cuna para el nacimiento de la TER.

En la siguiente sección, denominada ONDAS; aborda experiencias como las de arrojar un piedra al agua, algo muy sencillo, con lo cual dan explicación de la propagación de la onda, resaltando la frase “al cabo de cierto tiempo” para indicar como la hoja sube y baja al pasar la onda. Dicha frase después es tomada para indicar que las ondas necesitan cierto tiempo de pasar de vecindad a vecindad, y que por consiguiente, es necesario hablar en términos de velocidad, y de cómo esta depende del medio por el cual se propaga la onda y no de la velocidad de la fuente. Sin embargo, seguido a esto, se indica:

“...Ciertos tipos de ondas, de los que las ondas en el agua constituyen un ejemplo, tienen velocidades que dependen de la forma particular de la onda. Dado que esta forma depende de la naturaleza de la perturbación que la ha causado, cabría decir que la velocidad de la onda depende de dicha perturbación...”

A lo que agrega:

“... esta dependencia indirecta no tiene que preocuparnos, sobre todo dado que la velocidad de las ondas luminosas en el espacio, que es lo que en ultimo nos interesa, no dependen de la forma de la onda”

En este punto, sería válido preguntar: ¿Por qué la velocidad de las ondas luminosas no depende de la forma de la onda?

Y concluyen esta sección indicando nuevamente:

“En todos los casos reconocemos lo que es esencial en una onda: Una perturbación se mueve de un lugar a otro con la velocidad que viene determinada por las propiedades del medio mismo”

La siguiente sección, ONDAS PERIODICAS: FRECUENCIA Y LONGITUD DE ONDA, consideran el caso en el cual, la onda no es una perturbación única que pasa con el tiempo para luego desaparecer, sino de los fenómenos en los que la perturbación se repite periódicamente y emite ondas de manera regular. Desarrollan el análisis matemático del caso particular (fuente en reposo, medio en reposo).

Luego proceden a analizar el caso, en el cual, la fuente puede estar en movimiento. Abordado en la sección EL EFECTO DOPPLER, desarrollan el análisis matemático para esta nueva situación. Vistas desde experiencias con ondas mecánicas.

La sección que sigue, LA LUZ ES UNA ONDA, presenta, en primer lugar, la importancia de reconocer la existencia de un tipo de onda en el cual no es claro que se puede asociar con un fenómeno mecánico, como es el caso de las ondas mecánicas; y por consiguiente no sería viable argumentar que estas obedezcan al postulado de la relatividad.

“Sin embargo, existe otro tipo de fenómeno ondulatorio sumamente importante, la luz, del que no se es tan claro que se pueda decir que es un fenómeno mecánico”

Y para argumentar su comportamiento como onda, describe lo siguiente:

“...las pruebas de que la luz era un cierto tipo de onda eran ya abrumadoras, pero fueron los trabajos de Maxwell, no antes, lo que puso de manifiesto el carácter ondulatorio de la luz. Demostró teóricamente, y ellos fue confirmado más tarde por muchos experimentos, que la luz es una onda electromagnética.”

Indicando que la luz se comporta como onda y teniendo en cuenta que toda onda necesita de un medio de propagación, plantean la idea del Éter:

“El éter poseía algunas propiedades bastante notables. Parecía llenar todo el espacio. No era una sustancia mecánica en sentido ordinario, puesto que llenaba un vacío como queda probado por el paso de la luz a través del vacío más perfecto. Por consiguiente, carecía de peso. No absorbía energía alguna de la luz que pasaba por él y, por consiguiente, se le calificó de perfectamente elástico.”

Al contrario de una onda sonora, por ejemplo, disipa su energía pasado determinado tiempo y termina calentando el aire. Otra de las propiedades que describe el texto para el Éter sería la propiedad de atravesar libremente la materia, de acuerdo con las demostraciones astronómicas de la aberración.

La quinta sección del capítulo, corresponde a LA ABRREACION DE LA LUZ. Desarrollan una breve descripción del experimento realizado por Bradley en 1729, y aclara que este experimento no sirve para medir un movimiento uniforme en el espacio.

“Si el movimiento de la tierra fuese uniforme, las posiciones <<aparentes>> de todas las estrellas se desplazarían simplemente en una cantidad constante respecto de sus posiciones <<verdaderas>> y ninguna observación podría relevar la diferencia...”

Añadiendo:

...la importancia de la aberración para lo que estamos discutiendo consiste en que pone de manifiesto que la tierra se mueve en el medio por el que se propaga la luz. No arrastra el éter consigo, como hace con su atmosfera...”

Y concluye esta sección con las siguientes tres conclusiones:

“1. Es el experimento sobresaliente para probar que la Tierra realmente gira en torno al del sol, de modo que es el modelo del sistema solar debido a Copérnico, más bien que el de Ptolomeo, el que está de acuerdo con los hechos.

2. Si la luz se propaga en un medio -éter-, el éter penetra libremente a través de los tubos de los telescopios.

3. La tierra no arrastra consigo el éter, pero teniendo en cuenta los resultados, es probable que el éter penetre en la tierra y fluya libremente a través de ella.”

La sección siguiente, EL MOVIMIENTO A TRAVÉS DEL ESPACIO, presenta por medio de analogías la idea de que no nos estamos moviendo (Tierra) a través del éter a una velocidad mayor que la velocidad de la luz en el mismo. La analogía consiste en imaginar un río al cual lanzamos una roca; si la velocidad de la corriente del agua del río es mayor a la velocidad de propagación de la onda en el agua, entonces nunca veremos ver la onda ir en sentido contrario al sentido de la corriente del agua. Como se considera que el Éter como un medio mecánico, es de suponer que la relatividad ordinaria de la mecánica clásica fuese válida para este, lo que supone la idea con la propagación de la onda luminosa en el éter, análoga a la propagación de la onda causada por la piedra en el río. Dicho en otras palabras, si la tierra se moviese con mayor rapidez que la rapidez de la luz, al encender una bombilla en un cuarto, la propagación nunca alcanzaría una de las caras de la pared. Dado que esto no sucede en realidad, es lógico pensar que debemos movernos a una velocidad menor que la de la luz. Ahora bien, para poder dar cuenta del movimiento de la tierra a través del espacio, y debido a la gran diferencia entre la velocidad de la tierra con relación a la de la luz, se deberían desarrollar experimentos ópticos (ya que según el contexto anterior, permitirían detectar un movimiento absoluto a través del éter) en las cuales, se evidenciaran modificación muy pequeñas

en cuanto a diferencia temporal en mediciones cuidadosas de la intensidad de la luz que se propaga en sentidos opuestos a partir de una fuente de luz uniforme.

Una de los montajes experimentales más importantes para dar respuesta a ese gran planteamiento, es analizado en la sección 7 del capítulo; EL EXPERIMENTO DE MICHELSON MORLEY. No entrare en detalle en el montaje del experimento, pero si en las conclusiones que describieron tras no observar los resultados negativos del mismo.

“El experimento se proyectó de forma que su sensibilidad era suficiente para detectar el movimiento orbital de la Tierra en torno del sol, sin embargo ¡no se observó ningún corrimiento de las franjas! Hay varias explicaciones posibles de este efecto:

1. La tierra <<arrastra el éter consigo y, por lo tanto el aparato fijo respecto de la tierra no se está moviendo a través del éter... Explicación propuesta por Michelson. Sin embargo, es insostenible, ya que también conduciría a la imposibilidad de observar la aberración de la luz de las estrellas.

2. El brazo del aparato que se está moviendo paralelamente al movimiento a través del éter se contrae en un factor $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ y compensa así exactamente el desplazamiento esperado. Esta explicación, la llamada contracción de Lorentz-Fitzgerald. Si todas las fuerzas que mantienen juntos los átomos del aparato fuesen de naturaleza eléctrica, debería esperarse un tal cambio en la fuerza y, por consiguiente, en la longitud del brazo

3. Habría que modificar la teoría del electromagnetismo.

4. La luz no es una onda en el éter, sino más bien se compone de partículas sujetas a las leyes de la mecánica Newtoniana. Sin embargo, el mismo montaje experimental daba cuenta de que la luz es un movimiento ondulatorio.

5. La luz como de hecho todos los fenómenos electromagnéticos, obedece al principio de relatividad.”

La última conclusión parecía tan cierta, que Einstein hizo de esta propiedad de una onda de su segundo postulado:

“La velocidad de la luz es independiente de la velocidad de la fuente luminosa”

A lo que luego añade el autor:

“Ahora bien, esta conclusión nada tendría de notable considerada en sí. Afirma únicamente que la luz se comporta como una onda; basándose solo en este postulado la onda podría tener una velocidad c con relación a cierto medio, el éter. Es precisamente al combinar este postulado con el primero cuando empiezan a manifestarse notables consecuencias”

Termina el capítulo con el planteamiento de unos ejercicios.

Einstein: Científico y filósofo de German Guerrero Pino

Este gran libro, recoge las memorias del *Simposio internacional “Einstein: científico, filósofo y humanista. Centenario de una visión del mundo”* realizado del 28 de noviembre al 2 de diciembre del año 2005, con el apoyo de la Facultad de Ciencias, el Instituto de Educación y Pedagogía, la Facultad de Humanidades y el Departamento de Filosofía de la Universidad del Valle.

El texto está constituido por doce memorias, de las cuales solo discutiré acerca de aquellas que siento se relacionan más con el problema del segundo postulado de la TER.

Para no extenderme demasiado, simplificaré en un texto corto las ideas principales de cada una de estas memorias.

Capítulo II: Teoría especial de la relatividad y conocimiento a priori.

Partiendo de las dificultades que presentaba la mecánica desarrollada por Newton

- (i) La naturaleza del espacio y del tiempo postulado como marcos absolutos para referir las leyes de la mecánica.
- (ii) El origen y el estatuto epistemológico de las denominadas *Leyes del Movimiento*
- (iii) El sentido profundo de las denominadas *definiciones* (en particular, cantidad de materia, cantidad de movimiento, fuerza insita, fuerza impresa)
- (iv) El verdadero papel de las denominadas *Reglas para filosofar*.

Como resultado de lo anterior, se establecen discusiones que permiten el surgimiento de nuevas y diversas geometrías (No-euclidianas, proyectivas, métricas) estructuradas de forma a priori. En esta primera parte exploran las dificultades que el desarrollo de geometrías no-euclidianas generaba a quienes pretendiesen conservar las tesis más básicas del proyecto kantiano (lógica -Aristotélica-, geometría -euclidiana- y mecánica -Newtoniana-), encabezadas por el análisis de los postulados de la geometría Euclidiana y la negación del 5 postulado del mismo.

La segunda parte, dirigida hacia la revisión de la mecánica Newtoniana, debido a sus características de Tiempo y espacio absolutos, la existencia de una acción a distancia, y la no invarianza de las ecuaciones de Maxwell bajo las transformaciones de Galileo.

“...Einstein sugirió, entonces, un giro copernicano en la construcción de la mecánica con el objeto de encarar buena parte de las dificultades advertidas. Mientras la mecánica de Newton asume que (i) las medidas que diferentes observadores hacen de longitudes y comparaciones temporales han de ser absolutas e independientes de los estados de movimiento de los marcos de referencia en

donde se practican tales protocolos y (ii) a consecuencia de lo anterior, las llamadas *Leyes Fundamentales de la Física* valen sólo para ciertos marcos de referencia privilegiados (aquellos que reposan o se mueven con velocidad constante en línea recta en el marco del espacio absoluto), la mecánica de Einstein en contravía asume que (i) las leyes fundamentales de la física son absolutas, es decir, independientes del marco de referencia en el que los observadores pretenden establecerlas (no hay, entonces, marco de referencia privilegiado) y (ii) a consecuencia de lo anterior, las medidas que los observadores llevan a cabo de longitudes y comparación de movimientos han de tornarse relativas, es decir, ajustadas a las condiciones de los marcos de referencia que se pretende comparar.”

Dentro del marco de visión de las transformaciones de Galileo, es claro que en primer lugar, son las ecuaciones que permiten determinar las medidas de longitud y tiempo tomadas en un marco de referencia en términos de las medidas obtenidas en otro marco de referencia cuyo movimiento en relación con el primero está claramente determinado, en cuyo caso, mantendría invariante las características de las ecuaciones de la mecánica Newtoniana, es decir, se mantendrían las concepciones de espacio y tiempo como marcos absolutos, y segundo, no establecen un tope para el envío de información.

“...En ese orden de ideas, si conservamos las transformaciones de Galileo, conservamos con ellas el carácter absoluto de las medidas de longitud e intervalos temporales, podemos reservar para las leyes de Newton el calificativo de *Leyes Fundamentales* (dada su invarianza), no nos cuidaremos de reaccionar frente a la posibilidad de que una información pueda viajar a velocidades escandalosamente altas y hemos de buscar otras leyes para el electromagnetismo que merezcan el calificativo de fundamentales esperando que se mantengan invariantes bajo dichas transformaciones. Así las cosas, si, al contrario, exigimos un tope a la velocidad con que se pueda transferir información, otras deben ser las ecuaciones de transformación que permitan traducir la información que capturan dos observadores diferentes y otras las denominadas leyes de la físicas si exigimos de ellas la invariancia bajo una aplicación de tales transformaciones.”

El cambio que produjo el denominado giro Copernicano, presentan dos grandes tensiones, el primero expuesto anteriormente, y que se denomina principio de la relatividad:

“todos los observadores, independientemente del estado del sistema de referencia donde se encuentren, han de concebir las mismas leyes de la física”

Y la segunda gran tensión:

“existe una velocidad límite que no puede ser superada por ningún objeto material”

En el cual, el autor indica que se debe resumir con la **aceptación** del segundo postulado de la TER.

A lo que más adelante agrega:

“Mientras podemos estar dispuestos a aceptar el primer postulado sin mayores resistencias, la aceptación del segundo postulado, el de la constancia de la velocidad de la luz, ***nos tiene que ser impuesta casi a la fuerza*** (La negrilla y cursiva las he agregado yo). Los comentaristas suelen tener posiciones muy encontradas a la hora de establecer las condiciones que llevaron a Einstein a formular dicho enunciado a la manera de un postulado. Me inclino a pensar que la resistencia a admitir la posibilidad de una acción a distancia es realmente el motivo central; sin embargo no estoy interesado ahora en argüir en favor de dicha hipótesis.”

Continuado con la presentación de Potincare un año atrás, en la cual, ya había considera este postulado como uno de los principios básicos para la elaboración de una nueva mecánica. A partir de este punto el texto da inicio al camino de la elaboración del proyecto geometrización de Minkowski para la nueva teoría relativista.

Capítulo VII: El experimento de Michelson-Morley y el segundo postulado de Einstein: inextricablemente unidos

Héctor A. Múnera

Este texto, contiene información acerca del nivel de conocimiento que tenía Einstein al elaborar la teoría de la relatividad acerca del experimento de MM, Presenta duras críticas a los experimentos desarrollados por Michelson en 1881 y el experimento de 1887 desarrollado en conjunto con Morley. Presenta cartas de su prima, en la cual, desbordan la personalidad de Einstein, algunas aficiones y seguimientos a grandes científicos de dicho contexto.

En lo posible, tratare de transcribir la información más importante que brinda el capítulo, puesto que no estoy relacionado con la gran exactitud con la que describe los problemas que se tornaron en la elaboración del experimento de MM y la información que brindas las cartas. Mis conocimientos actuales acerca del tema, no garantizan que la información que presenta este capítulo, sea falsa o verdadera, por ahora solo será un punto de referencia a través de esta indagación.

En esta memoria, se describe con gran interés, contradecir los comentarios que corresponden a la validación de que Einstein, no tenía conocimiento de la existencia del experimento de MM.

Presenta ideas muy interesantes que son nuevas dentro de mi conocimiento, por ejemplo:

“En la actualidad el éter ha retornado disfrazado de un “vacío” con propiedades electromagnéticas, en el cual nacen y se hunden partículas y energías de todas clases, hasta invisibles.”

Presenta una fuerte crítica al modo experimental de Michelson con el experimento realizado en 1881 de igual forma en el experimento desarrollado por MM en el año de 1887, al igual que a los resultados y el análisis de los mismos

obtenido por dicho experimento, a continuación presento algunas de las ideas desarrolladas:

“El experimento fue diseñado por Michelson para medir corrimientos de 0.1 franja bajo el supuesto de que la rapidez del movimiento del sol es 30 km/s o menor. Sorprende que Michelson no hubiera considerado la otra alternativa lógicamente posible: movimiento solar con rapidez superior a 30 km/s. Podría conjeturarse a su favor que posiblemente en su época esa no fuera una alternativa razonable, por lo que era valedero no tenerla en cuenta en el *diseño* del experimento. Sin embargo, *no puede decirse lo mismo respecto a la interpretación del experimento*, especialmente al obtenerse los inesperados resultados negativos. En ese momento Michelson debió haber hecho un análisis de sensibilidad sobre todos los parámetros del experimento (tanto operativos como de diseño) para determinar cómo respondería el instrumento a condiciones diferentes a las supuestas. Esto no fue hecho ni en 1881, ni en 1887 constituyéndose en una nueva falencia en el proceso de interpretación. Sobra decir que en la actualidad se sabe que el sol se mueve con rapidez del orden de 300 km/s (Smoot, Gorenstein, Muller, 1977), según que el movimiento solar se considere respecto al centro de la galaxia, respecto a galaxias vecinas, respecto a la radiación de fondo, etc. Resumiendo, desde nuestra perspectiva actual, pero con enfoque pre-relativista, no hay ninguna razón para aceptar como válida la premisa principal del diseño del experimento de MM, que parte del supuesto que al mediodía la dirección oesteeste en el laboratorio es paralela a la dirección del movimiento de la tierra respecto al espacio absoluto.”

“Suponiendo que hubiera sido correcto, el análisis cualitativo de Michelson sólo sería válido para principios de abril, que fue cuando terminó sus observaciones en Postdam. Puesto que en tres meses la tierra ha avanzado aproximadamente un cuarto de la órbita anual, el análisis para abril no podría, ni puede, aplicarse directamente al experimento de MM realizado en julio de 1887 en Cleveland. Sin embargo, en ese caso Michelson también supuso que la única componente importante del movimiento terrestre era el desplazamiento orbital.”

“Bajo los mismos supuestos, el análisis de Michelson sólo sería válido para mediodía, pero no para las seis de la tarde cuando la tierra ha rotado 90°. En el experimento de MM de 1887 la mitad de las sesiones fueron vespertinas; sus valores se promediaron con los de mediodía, presumiblemente para eliminar armónicos indeseados. Este procedimiento presupone una relación lineal, pero en realidad la relación es mucho más compleja debido a la inclinación del eje de rotación de la tierra respecto al plano de la eclíptica, que genera una cambiante orientación del plano horizontal local (función de la latitud de Cleveland). Para una discusión más cuantitativa ver Múnera (2002).”

“... el análisis del efecto del movimiento solar en el artículo de 1887 es mucho más pobre que en el artículo de 1881...”

“La reducción de datos también presenta fallas significativas, como el hecho de promediar los valores del mediodía con los de la tarde (Múnera, 1998), que corresponden a situaciones distintas del interferómetro, ver Múnera (2002). Peor aún, lo mismo que en el experimento de 1881, no se hizo ningún análisis estadístico, y no aparecen barras de error en su figura final (que es el muy conocido icono que ha sido repetido en muchos textos para demostrar que el experimento fue negativo).”

Para dar razón de que Einstein si conocía el experimento de MM, presenta una serie de cartas escritas entre Einstein y Mileva, además de 5 entrevistas que le realizaron a partir de 1905 y cuyas respuestas eran contradictorias. Información que según el autor, son clara evidencia del conocimiento que tenía Einstein por lo menos desde 1889 acerca de los resultados del experimento de MM, conocimiento de los trabajos hacer del principio de la relatividad desarrollados por Poincare desde antes de 1905, entre otros, los cuales no es comentado por autores como Holton.

Los otros 3 capítulos de este libro, Einstein y el límite de la velocidad de la luz de *Gonzalo Munévar*, Einstein 1905: inteligibilidad racional y creación científica y Albert Einstein y la filosofía actual de la ciencia aunque son pertinentes para el trabajo, no se han sido redactados formalmente para ser presentados dentro de este avance.

Observaciones generales:

Estos textos presentan aportes significativos para el proceso de construcción de la herramienta que espero logre ser de ayuda para comprender el segundo postulado. Sin embargo, de la misma manera en que encuentro aportes significativos, encuentro grandes obstáculos.

En primer lugar, considero importante resaltar el valor apartado que interpreto le dieron a los experimentos de tipo óptico, para poder ser usado como herramientas con la cual determinar el movimiento de la Tierra con relación al éter. Debido a esto, es oportuno indagar en qué sentido interpretaban los experimentos ópticos y los experimentos electromagnéticos. Intentar comprender en qué momento se unifican, ¿Por qué se unifican?, y ¿Cómo se unifican?. De igual forma, hablar de la luz como una onda electromagnética, hoy en día, es algo muy natural entre nuestra comunidad, sin embargo, ¿entendemos por qué la luz es una onda electromagnética?, ¿Cómo demostraríamos que la luz es una onda electromagnética?. Claro está, este no debe ser el centro del trabajo, sin embargo considero que son piezas claves llegar a la construcción del mismo.

Los experimentos ópticos me direccionan hacia el experimento de Michelson y Morley. Según la tercera lectura, la fuerte crítica que desarrolla a la forma en la cual se desarrolló el experimento y a la forma como analizaron los datos, representa para mí (si dicha información es correcta) una gran incomodidad, debió en primer lugar, a indagar porque ningún texto de los cuales he consultado hasta el momento describe este tipo de análisis, describe estas deficiencias en la preparación del experimento, tratándose de un experimento el cual dio origen a la teoría de la relatividad, o por lo menos a un cambio en el pensamiento. ¿Estaría bien admitir las nuevas hipótesis por medio de los resultados en el experimento?, ¿bajo qué circunstancias un experimento que presente tantas dificultades, puede ser confiable?; ¿Por qué fue aceptado por la comunidad científica?, ¿Acaso fue un golpe de suerte el que coincidiera el resultado del experimento con lo que la nueva teoría indicaba?. Ahora

bien, en cuanto a si Einstein conocía o no el experimento de MM, considero que está de más indicar si lo conocía o no, quizás lo realmente importante es si influyo profundamente en su pensamiento.

Considerando estas ideas y las ya establecidas, que el problema a abordar para el trabajo contiene suficiente interrogantes para empezar a encajar parte por parte este gran rompecabezas. Sin embargo, soy consciente del desarrollo de nuevas interrogantes, bien dentro de la indagación de la búsqueda de las preguntas, o dentro del informe de práctica.

El ABC de la Relatividad de Bertrand Russell

Digitalización: maplewhite@gmail.com

El texto presentado a continuación, es la divulgación acerca de lo que es la Teoría de la Relatividad, tanto en su forma especial, como en la general.

Este texto está escrito de tal forma, que hace participe al lector aun cuando quizás este no tenga conocimiento alguno de la TER, y argumenta como es que a partir de la forma que vemos el mundo actual, tendemos a expandir tal idea y considerar bajo los mismos ojos con que vemos al mundo para describir el universo. Poco a poco introduce en el lector la idea de lo relativo, sacando de esa esfera de cristal en la cual alguna vez nos encontramos.

Asegura como las leyes que gobiernan las leyes del universo no son tan lineales que las que gobiernan la tierra, y que por tanto, se hace necesario cambiar el modo como pensamos acerca de este.

Pone sobre la mesa, aspecto que bajo la perspectiva newtoniana dificulta la comprensión de la física que hoy en día, analizándolos cuidadosamente y comparándolos entre lo que creemos correcto y lo que es correcto logrando una transformación en el pensamiento del lector de un pensamiento clásico, a un pensamiento más relativo.

“La física intenta informar sobre lo que ocurre en el mundo físico, y no sólo sobre las percepciones privadas de cada uno de los observadores. La física, pues, ha de interesarse por aquellos aspectos que un proceso físico presenta a todos los observadores. Tales aspectos sólo pueden considerarse como pertenecientes al mismo hecho físico. Ello exige que las leyes de los fenómenos hayan de ser las mismas, tanto si se describen tal como aparecen ante un observador o como ante otro. Este único principio es el motivo generador de toda la teoría de la relatividad.” (Russell, PDF, p. 13)

Asegura que la velocidad de la luz en el vacío es de 300.000 kilómetros por segundo, asegurando además, que esta misma velocidad es alcanzada por las ondas electromagnéticas, de las cuales después, se aseguró pertenecía la luz.

Desarrolla el barrido histórico que pone en evidencia las consecuencias de considerar por primera vez la luz como una onda, y los trabajos experimentales que sobre ella se desarrollaban para describir el movimiento de la tierra respecto al medio por el cual la luz podía propagarse, el éter.

Explica lo ocurrido en el análisis del experimento de M.M de tal manera que el lector puede comprenderlo en su esencia sin entrar en dificultades algorítmicas y el por qué de su resultado negativo

“Si un cuerpo emite un rayo de luz, ese cuerpo seguirá siendo el centro emisor de las ondas a medida que éstas se dirijan hacia fuera, cualquiera que sea la forma de su movimiento; al menos tal sería la idea de los observadores que se mueven con el cuerpo.” (Russell, PDF, p. 17)

Explicando que si no fuera así, él podría identificar rápidamente que él es quién se mueve respecto a los demás, y se podría considerar como un marco de referencia privilegiado; se daría cuenta de esto, porque los rayos de luz emitidos por él, describirían una velocidad diferente menor o mayor a la que corresponde la velocidad de la luz.

Analiza las ideas del espacio y del tiempo, la simultaneidad de eventos y la relatividad presente en el movimiento de los cuerpos desde la mecánica clásica, y las pone en contra posición con los argumento de que la velocidad de transformación de información no es finita, sino que tiene un límite que corresponde con el de la velocidad de la luz

“Las distancias en el espacio, lo mismo que los periodos de tiempo, no son en general hechos físicos objetivos, sino en parte dependientes de un observador.”
(Russell, PDF, p. 27)

Por medio delo anterior, se dispone a desarrollar experimentos alejados una distancia considerable teniendo en cuenta las conclusiones obtenidas tanto desde la perspectiva clásica de velocidades infinitas como de la nueva interpretación de una velocidad límite de información.

En orden secuencial, he introduciendo poco a poco la TER, analiza lo que ahora es considerado como espacio-tiempo, argumentación que se solidifican por medio de explicaciones que sin ser alejadas al lector, le permiten visualizar las necesidades que llevaron a concluir tales planteamientos.

“Con respecto al tiempo, se creía que el problema era totalmente diferente. Los únicos elementos arbitrarios en el cómputo del tiempo eran la unidad y el punto del tiempo desde el que comenzaba dicho cómputo. Se podía medir según la hora de Greenwich, de Paris o de Nueva York. Esto constituía una diferencia en cuanto al punto de partida. Se podía medir en segundos, minutos, horas, días o años. Era una diferencia de unidad. No existía nada relativo a la libertad de elección por lo que respecta al método de fijar la posición en el espacio. Y, en particular, se creía que el método de fijar la posición en el espacio y el método de fijar la posición en el tiempo podía hacerse de forma totalmente independiente el uno del otro. Por estas razones, la gente consideraba que el tiempo y el espacio eran dos cosas completamente distintas.”

A lo anterior lo complementa:

“Ya no existe un tiempo universal que se pueda aplicar sin ambigüedad a cualquier parte del universo. Sólo existen diversos tiempos ((propios)) de los diversos cuerpos del universo que coinciden aproximadamente en dos cuerpos que no tienen un movimiento rápido, pero que no coinciden exactamente nunca, a no ser que sean dos cuerpos en reposo y en relación mutua.” (Russell, PDF, p. 32)

Además de continuar el análisis que se deriva de considerar una velocidad límite de información

“La antigua separación de espacio y tiempo se basaba en la creencia de que no había ambigüedad en afirmar que dos hechos en lugares distintos sucedían al mismo tiempo. En consecuencia se pensaba que podíamos describir la topografía del universo en un momento dado y en términos puramente espaciales. Pero ahora que la simultaneidad resulta relativa a un observador particular, ello ya no es posible.” (Russell, PDF, p. 36)

Después de haber desarrollado una contextualización suficientemente rigurosa entro lo que pasa en la mecánica clásica y las consecuencias que se derivan de considerar la luz como velocidad límite de información, el sexto capítulo de este documento, se sumerge en los mares de la TER.

Sin embargo, antes de sumergirse a aguas más profundas, explica el origen de lo que se considera es el origen de la teoría, nuevamente basado en la

demostración de los absolutos clásicos que nada tenían que ver con las ondas electromagnéticas y por tanto de la luz.

“Poco a poco se fueron acumulando hechos de este género, hasta que se hizo necesario encontrar una teoría que pudiera englobarlos a todos” (Russell, PDF, p. 40)

Refiriéndose a la fuerza a distancia concebida en la cuna de la mecánica clásica, la demostración del éter, y el fracaso del experimento de M.M.

Introduce con gran comodidad los trabajos desarrollados por Maxwell, la necesidad de ver el tiempo de forma local y no universal, sus consecuencias (dilatación del tiempo) y las contraposiciones de las transformaciones de Lorentz con las transformaciones galileas:

“En la física ortodoxa derivada de Galileo, un movimiento uniforme en línea recta no tiene efectos perceptibles. Esto fue en su día una forma de la relatividad tan asombrosa como la de Einstein lo es para nosotros. Einstein, en la teoría especial de la relatividad, trató de demostrar cómo los fenómenos electromagnéticos podían no verse afectados por el movimiento uniforme a través del éter, caso de existir el éter. Este era el problema más difícil, que no se podía resolver con sólo acudir a los principios de Galileo” (Russell, PDF, p. 40)

“La transformación de Lorenz nos dice qué estimación de distancias y periodos de tiempo habrá de hacer un observador cuyo movimiento relativo es conocido, si sabemos los de otro observador.” (Russell, PDF, p. 41)

Todo lo anterior se manifiesta como preludio analítico para lo que será el desarrollo de este libro a partir de ese sexto capítulo en adelante, es decir, el análisis de las TER, sus efectos, y posteriormente sumergirse en la Teoría General de la Relatividad.

Para finalizar esta sección y dar pie al análisis de este libro, la aparición del segundo postulado es presentado de la siguiente manera:

“Ha de aceptar el resultado de que la velocidad de la luz es la misma para todos los observadores, aunque puedan estar moviéndose. Ha de aceptar también que los fenómenos físicos —en particular los del electromagnetismo— obedecen a las mismas leyes para los mismos observadores, aun cuando puedan comprobar que sus medidas de distancias y tiempos se ven afectadas por su movimiento”. (Russell, PDF, p. 41)

El libro no se centra en explicar el segundo postulado, no se creó con este propósito. Es una herramienta muy cómoda que permite a un lector con conocimientos básicos de la física sentirse cómodo con el desarrollo de la lectura. Este libro resalta la importancia que tiene reconocer las consideraciones que dieron pie para construir tan majestuosa teoría, sin necesidad de explicar absolutamente todo lo relacionado con cada una de estas consideración, tan solo rescata aquellas temáticas que son necesarias revisar para hacerse una idea del por qué fue necesario modificar eso que hemos creído correcto a lo largo de nuestras vidas, y entender cuál fue el proceso del cambio, las dificultades que se encontraron y la forma como se solucionaron.

Esta escrito de tal forma, que es posible encontrar un ejemplo simple y no ajeno para cada temática abordada, que parte o bien de la experiencia del lector o de una minucioso guía que permita poner en evidencia lo que se está tratando, lo que permite al mismo, hacer una imagen más clara de lo que ocurre en el interior del análisis en cuestión y así, obtener una mayor visualización de lo que ocurre a través de sus explicaciones.

Sin embargo, en lo que respecta a la razón de observar este análisis, nuevamente nos encontramos con el carácter de aceptación que tanta fama se ha venido desarrollando. No se intenta dar una explicación del por qué ocurre de esta manera, y cómo es posible visualizarlo.

A pesar de lo anterior, considero que es una herramienta excelente para aquellas personas que sin saber mucho de quieren llegar a conocer los cimientos, el surgimiento y el por qué de la TER.

Sobre la teoría de la relatividad especial y general de Albert Einstein

El presente librito pretende dar una idea lo más exacta posible de la teoría de la relatividad, pensando en aquellos que, sin dominar el aparato matemático de la física teórica, tienen interés en la teoría desde el punto de vista científico o filosófico general. (Einstein, PDF, p. 3)

En este libro se encuentra el análisis de los aspectos que deben ser tenidos en cuenta para la formalización de la TER, es decir, aquellos aspectos que a través de la línea del tiempo del desarrollo de la física son necesarios considerar y análisis, para de esta forma encontrar sentido al surgimiento de la teoría.

De esta manera, desarrolla el trabajo con la intención de elaborar un enfoque analítico desde aquellas primeras dificultades que se presentaron en el pensamiento mecanicista clásico, su visión del tiempo y el espacio, la relatividad de esta mirada, su adición de velocidades, el surgimiento y las dificultades que trajeron consigo el límite de velocidad con que se puede enviar información, que dan paso a los análisis más detallados acerca de la concepción de la simultaneidad, el espacio-tiempo, los efectos de la dilatación del tiempo y la contracción de la longitud bajo la influencia de

las transformaciones de Lorentz, hasta el análisis de la suma de velocidades relativistas y el sentido de la relatividad.

Todo lo anterior es pues, el origen de los desarrollos de futuros trabajos de divulgación, cosa que ya hemos obtenido y revisado en otros textos, pero a diferencia de ellos, considero que este texto plantea la problemática que realmente dificulta la comprensión del segundo postulado.

El problema no está en entender lo que dice el segundo postulado, inclusive uno puede crear una respuesta clara de esto a partir del análisis de marcos de inerciales, el problema real está cuando intentamos aplicar el postulado a una situación mínima particular, Albert Einstein confirma en este texto lo mencionado anteriormente:

“Lo que nos interesa averiguar es la velocidad de propagación del rayo de luz respecto al vagón.” (Einstein, PDF, p. 10)

La dificultad se reduce si se sabe que para los del vagón el sistema permanece en reposo y que por tanto, no es necesario desarrollar mayor análisis para la situación, pero es cuando se sabe que la nave es quien se mueve respecto a nosotros, que las cosas cambian profundamente debido a que para nuestro arcaico sentido común, no tiene absolutamente ningún sentido decir que los rayos se alejan del vagón a una velocidad C , cuando el mismo vagón se mueve en sentido de la propagación de los rayos.

Siguiendo con este planteamiento, escribe lo siguiente:

“Ahora bien, este resultado atenta contra el principio de la relatividad expuesto en §5, porque, según este principio, la ley de propagación de la luz en el vacío, como cualquier otra ley general de la naturaleza, debería ser la misma si tomamos el vagón como cuerpo de referencia que si elegimos las vías, lo cual parece imposible según nuestro razonamiento. Si cualquier rayo de luz se propaga respecto al terraplén con la velocidad c , la ley de propagación respecto al vagón parece que tiene que ser, por eso mismo, otra distinta... en contradicción con el principio de relatividad.

A la vista del dilema parece ineludible abandonar, o bien el principio de relatividad, o bien la sencilla ley de la propagación de la luz en el vacío. El lector que haya seguido atentamente las consideraciones anteriores esperará seguramente que sea el principio de relatividad —que por su naturalidad y sencillez se impone a la mente como algo casi ineludible— el que se mantenga en pie, sustituyendo en cambio la ley de la propagación de la luz en el vacío por una ley más complicada y compatible con el principio de relatividad. Sin embargo, la evolución de la física teórica demostró que este camino era impracticable. Las innovadoras investigaciones teóricas de H. A. Lorentz sobre los procesos electrodinámicos y ópticos en cuerpos móviles demostraron que las experiencias en estos campos conducen con necesidad imperiosa a una teoría de los procesos electromagnéticos que tiene como consecuencia irrefutable la ley de la constancia de la luz en el vacío. Por eso, los teóricos de vanguardia se inclinaron más bien por prescindir del principio de relatividad, pese a no poder hallar ni un solo hecho experimental que lo contradijera.

Aquí es donde entró la teoría de la relatividad. Mediante un análisis de los conceptos de espacio y tiempo se vio que *en realidad no existía ninguna incompatibilidad entre el principio de la relatividad y la ley de propagación de la luz*, sino que, ateniéndose uno sistemáticamente a estas dos leyes, se llegaba a una teoría lógicamente impecable. Esta teoría, que para diferenciarla de su ampliación (comentada más adelante) llamamos «teoría de la relatividad especial», es la que expondremos a continuación en sus ideas fundamentales.” (Einstein, PDF, p. 10)

A pesar de que el texto tiene una calidez hacia el lector aportando en cada línea más y más justificaciones para establecer la TER, es lo descrito anteriormente lo que me impulsa enormemente a encontrar solución, pues considero qué es aquí, donde surge el problema de todo lo relacionado a la comprensión.

El libro es una buena herramienta que permite aclarar muchas dificultades a iniciantes en la comprensión de la TER, sin embargo, considero que no está escrito para un público en general, puesto que algunas de sus representaciones, son

justificadas bajo supuestos matemáticos que no son conocidos por personas ajenas al estudio de la física.

En conclusión de todo lo analizado, cabe decir que es un poco nostálgico ver como los textos dedicados a la enseñanza de la física, quizás no consideran el problema de presentar una justificación adecuada al segundo postulado de la TER. Debido a esto, en vez de generar conocimiento puro, comprensible y admisible, crea soluciones facilistas, que no dejan ver el verdadero significado y sentido de las cosas. Con esto no se quiere decir, que el libro deba tratar toda la teoría de la luz, pero sí, que mencione el Por qué se hacen estas consideraciones, que se le dé la importancia que tiene el postulado dentro de la teoría.

En cuanto al texto histórico-filosófico, alimenta la construcción de nuevas nociones que son el desprendimiento de la mecánica racional a la nueva concepción electromagnética. Aunque no da razón precisa del postulado, dan cuenta del desarrollo en el ámbito de las teorías electromagnéticas y de las teorías de la ondulación, por tanto el trabajo se centrara en la indagación, comprensión y la relación que existe entre estas dos. Por otro lado, ubica el papel que desarrolla la velocidad de la luz dentro de la teoría y cómo esta es la base para el desarrollo de nuevas nociones.

En los textos de divulgación, en primer lugar, es importante resaltar como intentan establecer las dificultades del sentido común que rigen nuestro pensamiento por medio de los experimentos mentales, razonables y justificados si se considera la

velocidad de la luz como velocidad límite; y en segundo lugar, el sentido e importancia que resaltan con gran determinación al indicar que esta es una ley fundamental de la naturaleza.

A partir de todo lo anterior, de cada análisis y de cada exposición de las presentaciones de cada texto, teniendo en cuenta las dificultades y los aportes significativos encontrados, en referencia al segundo postulado de la TER, surgen ideas, conceptos y planteamientos mínimos que en conjunto con criterios personales y académicos, desarrollan la posibilidad de construir una herramienta que a partir de ejemplos, experiencias y analogías, solvante las dudas que no son tratadas, según el presente análisis, por los textos anteriormente mencionados, y así mismo que integre los aportes de dichos autores que permitan dar una dirección sustentada y comprensible al segundo postulado de la TER.

Teniendo en cuenta que como primera medida sería de vital aporte responder las siguientes preguntas,

Preguntas como las siguientes.

¿Qué tipo de onda es la luz?

¿Qué característica contiene este tipo de ondas?

¿Qué diferencia existe entre estas ondas electromagnéticas y las ondas mecánicas?

¿De qué depende y cuáles son las características de la velocidad de la onda?

¿Cuál es la influencia de la velocidad de la fuente respecto a las ondas?

¿La medición de la velocidad de una onda mecánica se verá afectada, si por el medio en que se propaga tienen un desplazamiento debido a una corriente del mismo?

¿Cuál será el resultado si cambiamos la onda mecánica por una onda luminosa?

¿Basta solo con el primer postulado para fundamentar la TER?

¿Acaso no son los dos postulados independientes?

¿Cómo sería la relatividad sin el segundo postulado?

Preguntas cuya solución estará sumergida en el documento a crear, con el fin de llenar vacíos que existan o puedan existir, tal y como ocurrió en los textos analizados.