



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

ORIGEN Y EVOLUCION DE LOS CONCEPTOS DE LA  
TEORIA ESPECIAL DE LA RELATIVIDAD

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

**F I S I C O**

P R E S E N T A

**GREGORIO SALVADOR NAVA JACINTO**

DIRECTOR DE TESIS: M. en C. IGNACIO CAMPOS FLORES



FACULTAD DE CIENCIAS  
UNAM

2004



FACULTAD DE CIENCIAS  
SECCION ESCOLAR



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.  
NOMBRE Gregorio Salvador Nava Jacinto

FECHA: 10-12-04  
FIRMA: Gregorio Salvador Nava Jacinto

**ACT. MAURICIO AGUILAR GONZÁLEZ**  
**Jefe de la División de Estudios Profesionales de la**  
**Facultad de Ciencias**  
**Presente**

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo escrito:  
"Origen y evolución de los conceptos de la teoría especial de la relatividad"

realizado por Nava Jacinto Gregorio Salvador

con número de cuenta 6409531-0 , quien cubrió los créditos de la carrera de: Física.

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

**Atentamente**

Director de Tesis  
Propietario

M. en C. Ignacio Campos Flores

Propietario

Dr. Juan Manuel Lozano Mejía

Propietario

M. en C. José Hermenegildo Peña Saint Martín

Suplente

Dra. María del Pilar Segarra Alberú

Suplente

Fís. Plutarco Alejandro González y Hernández

**Consejo Departamental de Física**

Alicia Zarzosa Pérez  
**M. EN C. ALICIA ZARZOSA PEREZ**  
**Coordinadora de Licenciatura**

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a los distinguidos maestros de la Facultad de Ciencias que impartieron cursos de profundización y actualización de conceptos, leyes y teorías físicas, así como conferencias, a los profesores del Colegio de Bachilleres durante los últimos veinte años. Dichos cursos nos mostraron la necesidad de actualizarnos en el desarrollo de las teorías físicas.

Fis. Romilio Tambutti R.

Dra. Silvia Bravo Núñez

Fis. Juan Américo González M.

Dr. Marco Antonio Martínez Negrete

Fis. J. C. Miguel Núñez

Fis. P. Alejandro González y Hernández

Dra. María del Pilar Segarra Alberu

Dr. Juan Manuel Lozano

M. en C. Ignacio Campos Flores

Fis. María Isabel Villaseñor

Dr. Eugenio Ley Koo.

M. en C. Jorge Andrade

## ÍNDICE

INTRODUCCION .....	1
<b>CAPITULO I. LA RELATIVIDAD EN LA MECÁNICA NEWTONIANA.</b>	
a) <b>La relatividad del movimiento.</b> .....	4
1. Sistemas de referencia	
2. Relatividad de las trayectorias y velocidades	
b) <b>Principio de relatividad de Galileo.</b> .....	8
1. Sistemas inerciales de referencia	
2. Ecuaciones de transformación de Galileo	
3. Suma clásica de velocidades	
4. Invariancia de la distancia entre dos puntos, los intervalos de tiempo y las velocidades relativas con respecto a las transformaciones de Galileo	
5. Conservación del momento lineal en diferentes sistemas de referencia inerciales.	
6. Relación entre la fuerza medida por dos observadores inerciales moviéndose con una velocidad relativa constante.	
7. Conservación de la energía mecánica en los sistemas de referencia inerciales en movimiento relativo de traslación uniforme.	
<b>CAPITULO II. LA ELECTRODINÁMICA ANTES DE LORENTZ.</b>	
a) <b>ÓPTICA: Teoría ondulatoria y teoría corpuscular, Bradley, Young Arago, y Fresnel, Stokes, Michelson.</b> .....	26
b) <b>Desarrollo de la electrodinámica: Teorías de campo y teorías de acción a distancia, Faraday, Weber, Neumann, Maxwell, Hemholtz, Hertz.</b> .....	42
<b>CAPITULO III. LOS TRABAJOS DE LORENTZ Y POINCARÉ.</b> .....	60
<b>CAPITULO IV. LA RELATIVIDAD ESPECIAL.</b> .....	68
1. Influencias filosóficas sobre Einstein.	
2. La relatividad de la simultaneidad	
3. Postulados de la teoría especial de la relatividad	
4. Ecuaciones de transformación de Lorentz	
5. Contracción de Lorentz, dilatación del tiempo, suma relativista de velocidades	
6. Momentum relativista	
7. Energía relativista	
<b>CAPITULO V. ACEPTACIÓN DE LA TEORÍA ESPECIAL DE LA RELATIVIDAD.</b> .	107
Recepción de la teoría de la relatividad en:	
1. Francia	
2. Estados Unidos	
3. Gran Bretaña	
4. Alemania	
<b>CONCLUSIONES</b> .....	114
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	116

## INTRODUCCION

El presente trabajo nació de la inquietud al tratar de explicar a los estudiantes del quinto semestre del Colegio de Bachilleres algunos temas de física moderna, tales como: Los límites de validez de la mecánica newtoniana, el principio de relatividad de Galileo, el experimento de Michelson-Morley, los postulados de la teoría especial de la relatividad y la conservación de la masa-energía, entre otros. Estos son temas del programa de estudios de Física Moderna I que se imparte actualmente en el Colegio de Bachilleres.

Después de analizar las posibles dificultades que enfrenta el profesor al tratar de explicar los conceptos anteriores, se llegó a la conclusión de que las más sobresalientes son:

- La impartición de estos temas es un tanto dogmática, porque deja de lado el contexto histórico, de cómo surgieron los conceptos y teorías, cómo se desarrollaron y finalmente, cómo fueron aceptadas después de un intenso debate.
- Al revisar la bibliografía de consulta de física del nivel Medio Superior, se encontró que no existen textos que aborden una perspectiva histórico-epistemológica del desarrollo de la relatividad especial.
- Se ha observado en los cursos de Actualización y Formación de profesores que imparte la Institución, que la mayoría de los participantes no poseen el dominio conceptual de la mecánica clásica y del electromagnetismo , así como

tampoco, tienen una visión general del campo de la física, por lo tanto no pueden establecer relaciones entre las diferentes ramas de la misma.

- Por último, el programa de Física Moderna I, carece de una secuencia lógica en la presentación de los contenidos, lo que conlleva a que los docentes enseñen los conceptos desarticulados; no existe un puente entre la mecánica clásica, el electromagnetismo y la relatividad especial.

Respondiendo a las problemáticas mencionadas, se elaboró este material de apoyo, que tiene como finalidad mostrar a los docentes un posible camino de cómo abordar la teoría especial de la relatividad para estudiantes en el nivel Medio Superior. Sin embargo no se pretende que el enfoque aquí presentado sea aplicable tal cual en el salón de clase. Cada maestro deberá explorar por su cuenta que parte y cómo se puede enseñar a los alumnos del nivel medio. Este trabajo consta de las siguientes partes:

El capítulo I, muestra que en la mecánica de Newton, las posiciones y velocidades de los cuerpos son cantidades físicas relativas. La ley fundamental de movimiento, la ley de conservación de la energía y del momento lineal son invariantes con respecto a las transformaciones galileanas.

El capítulo II, menciona los modelos corpuscular y ondulatorio de la luz, y la discusión que sobre ellos existió. También se desarrollan las teorías de campo y de acción a distancia hasta finalizar el siglo XIX.

El capítulo III, muestra los trabajos de Lorentz y Poincaré sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento.

El capítulo IV, reseña el trabajo de A. Einstein sobre la teoría especial de la relatividad, señalando algunas de las posibles influencias que tuvo, tanto filosóficas como científicas.

Por último en el capítulo V se comenta cómo la teoría especial de la relatividad fue siendo aceptada en países como: Francia, Estados Unidos, Gran Bretaña y Alemania.

## CAPITULO I. LA RELATIVIDAD EN LA MECÁNICA NEWTONIANA.

### a) LA RELATIVIDAD DEL MOVIMIENTO.

#### 1. SISTEMAS DE REFERENCIA.

Vivimos en un mundo donde a simple vista se aprecia que todo está en movimiento: una persona caminando, un pájaro volando, un río que fluye, un avión en vuelo, el Sol y la Luna moviéndose respecto a la Tierra. También sabemos que las moléculas de un cuerpo están en movimiento. Luego el movimiento es el fenómeno fundamental, y todos los fenómenos que observamos se reducen a algún tipo de movimiento o cambios en el movimiento de varios cuerpos.

¿Pero cómo determinamos el movimiento de los cuerpos? La velocidad de un tren tiene cierto valor si la mide un observador situado en la Tierra; la velocidad será diferente si la mide un observador que se encuentra en un automóvil en movimiento, y será cero si la mide un observador que se encuentra sentado en el mismo tren. ¿Cuál de estos valores tiene alguna ventaja respecto de los otros?. La respuesta es que ninguno de estos valores tiene una ventaja sobre cualquier otro; cada uno es igualmente correcto desde el punto de vista del observador que realiza la medida. El valor de la velocidad depende del sistema de referencia del observador que realiza la medida. Esto es cierto para otras cantidades físicas como las posiciones, desplazamientos, aceleraciones, fuerzas y otras cantidades, si el sistema de referencia es totalmente arbitrario.

Hoy sabemos que para localizar un cuerpo o un evento en el espacio, necesitamos dar sus coordenadas espaciales y temporales con respecto a un cuerpo de referencia que consideramos inmóvil. Para esto fijamos en el cuerpo de referencia un sistema de coordenadas para localizar las posiciones y un conjunto de relojes para medir los intervalos de tiempo.

Para Aristóteles, el estado natural de los cuerpos es el reposo en relación a la Tierra inmóvil y cualquier desplazamiento en relación a nuestro planeta debería ser causado por una fuerza (es el movimiento violento). De lo anterior, podemos afirmar que entre los antiguos griegos algunos sostenían el punto de vista de que sólo existía un cuerpo de referencia: la Tierra inmóvil. La vigencia del sistema geocéntrico impidió que los físicos de la Edad Media se preocupasen por describir el movimiento de un cuerpo respecto a otro también en movimiento, que sería el caso de la Tierra móvil.

Nicolás Copérnico, en su libro *De Revolutionibus Coelestium*, retoma la idea del universo heliocéntrico, sistema defendido antes por Aristarco de Samos (320-250 a. C.). Según este modelo la Tierra no está inmóvil, sino que gira alrededor del Sol, dando lugar a otro problema: cómo explicar los movimientos de los cuerpos en la superficie de la Tierra en movimiento.

Para Newton, si ninguna fuerza actúa sobre un cuerpo, su estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme no se altera. ¿Con respecto a qué no se altera?

Respecto a las estrellas fijas contestaba Newton, ya que la Tierra se encuentra tanto en movimiento de traslación alrededor del Sol como de rotación en torno a su eje.

Mas tarde, el estudio de las ondas mecánicas introdujo la noción de velocidad con respecto a un medio, por ejemplo, la velocidad del sonido respecto al aire. Posteriormente, J. C. Maxwell sintetizó en una teoría física los trabajos experimentales del electromagnetismo, que fueron desarrollados por Coulomb, Ampere, Oersted, Bio-Savart y Faraday. Uno de los resultados fue la implicación de que la luz es una onda electromagnética. El campo electromagnético debería propagarse en el vacío a la velocidad de la luz. ¿Pero con respecto a qué sistema de referencia se propagaba con esta velocidad? Se propuso que el sistema de referencia era el éter, medio hipotético respecto al cuál las ecuaciones de Maxwell se escriben en su forma más simple. Pero las ecuaciones de Maxwell no son invariantes bajo una transformación galileana.

## *2. LA RELATIVIDAD DE LAS TRAYECTORIAS Y LAS VELOCIDADES.*

Consideremos el movimiento de unos proyectiles lanzados desde un tren militar que se mueve con velocidad constante y que son observados por dos personas, una que viaja en el tren y otra que permanece en el andén.

Para la primera persona, su sistema de referencia es el tren, mientras que para la segunda su sistema de referencia permanece fijo en el andén. Supongamos que se

dispara un proyectil cuando el tren pasa frente a la estación y media hora después se dispara otro proyectil. La primera persona observará que en su sistema de referencia (el del tren), ambos disparos se efectúan en el mismo lugar. Es decir, en el lugar donde se encuentra el cañón, el cual no ha cambiado de posición con respecto al tren. Para el segundo observador, en media hora el tren se habrá alejado del andén, por lo que concluirá que ambos disparos ocurren en lugares diferentes.

¿Cuál de los dos observadores tiene razón? La pregunta no tiene sentido si no mencionáramos el sistema de referencia desde el cual se observa el movimiento. Luego, la posición de los cuerpos o eventos tiene sentido relativo. Así, dos eventos que ocurren en un mismo sitio con respecto a un sistema de referencia, pero a tiempos diferentes, ocurrirán en lugares diferentes en otro sistema de referencia en movimiento relativo con relación al primero.

¿Cómo se mueve en realidad un cuerpo? Si decimos que un cuerpo se mueve, esto significa simplemente que cambió su posición con respecto a otro cuerpo tomado como referencia. Si examinamos el movimiento de un cuerpo desde varios sistemas de referencia que se desplazan con movimiento relativo uniforme, este movimiento tendrá aspectos diferentes.

Consideremos un avión con movimiento horizontal uniforme que deja caer un paquete con medicamentos. El paquete cae casi en línea recta respecto al piloto, pero con respecto a un observador en Tierra, el paquete describirá una curva

denominada parábola. Así, la trayectoria de un cuerpo observada en dos sistemas de referencia que se mueven uno con respecto a otro es diferente.

También la velocidad de los cuerpos es relativa. Retomando el ejemplo anterior, para el piloto, la velocidad horizontal del paquete es nula; para el observador terrestre ésta es igual a la velocidad del avión con respecto al sistema de referencia fijo en la Tierra.

## **b) PRINCIPIO DE RELATIVIDAD DE GALILEO.**

### *1. SISTEMAS DE REFERENCIA INERCIALES.*

Nuestra experiencia cotidiana nos demuestra que los objetos en movimiento sobre la superficie terrestre alcanzan el reposo si se les deja libres, y que para que continúen en movimiento debemos aplicarles continuamente una fuerza. En el siglo XVII, Galileo Galilei (1564-1642) estudió los movimientos de diversos cuerpos sobre planos inclinados. Observó que en el caso de un objeto que desciende por un plano inclinado está presente una causa de aceleración, mientras que si el objeto asciende por el plano con una velocidad inicial hay una causa de retardamiento. De estas experiencias razonó que cuando las pendientes de los planos no son ascendentes ni descendentes no debe haber aceleración ni retardamiento. Es decir, el movimiento a lo largo de un plano horizontal debe ser permanente. Sin embargo, Galileo sabía que los movimientos horizontales no eran permanentes. Se dio cuenta que cuando la fricción disminuía, los cuerpos se movían durante mayor tiempo con velocidad

aproximadamente constante. Con estos argumentos, Galileo se convenció de que la fricción proporcionaba las fuerzas que detenían los cuerpos en el movimiento horizontal. Este es el contenido del principio de inercia de Galileo: si no se ejerce ninguna fuerza sobre un cuerpo, éste permanecerá en reposo o se moverá en línea recta con velocidad constante. (Haber-Schaim., 1998, pp. 258-260).

Posteriormente I. Newton estableció el principio de inercia en forma generalizada en su primera Ley de movimiento, tal como lo presentó en sus Principia: "Todos los cuerpos perseveran en su estado de reposo o de movimiento uniforme en línea recta, salvo que se vean forzados a cambiar ese estado por fuerzas impresas".

El enunciado de la primera Ley no hace distinción entre un cuerpo en reposo y otro que se mueve con velocidad constante, dado que ambos estados se dan en ausencia de fuerzas. Por ejemplo, imaginemos un cuerpo en reposo en un tren que se mueve horizontalmente con velocidad constante. Un pasajero ve el cuerpo en reposo, mientras que el observador terrestre ve el objeto moverse con velocidad constante. Ambos observadores dirán que el cuerpo no tiene aceleración, y los dos observadores, con base en la primera Ley de Newton, concluirán que no actúa fuerza alguna sobre el cuerpo. Además, se hace notar que no hay diferencia en la primera Ley entre ausencia de fuerzas y la presencia de fuerzas cuya resultante es cero.

Los sistemas de referencia, donde los cuerpos están en reposo o se mueven a velocidad constante en ausencia de fuerzas, se denominan *sistemas de referencia inerciales*. Los experimentos muestran que los sistemas de referencia inerciales,

entre los que se encuentra –para todos propósitos prácticos- el de la Tierra, son equivalentes para la descripción de los fenómenos físicos.

De lo anterior, el principio de inercia de Galileo puede formularse así: *“Existen ciertos sistemas de referencia con respecto a los cuales el movimiento de un objeto, libre de cualquier fuerza externa, se mueve en línea recta con velocidad constante, incluida la velocidad cero”*. (French, A. P., 1971, pp 161-163).

Debemos señalar que el concepto de sistema de referencia inercial es una abstracción, que en la práctica sólo se realiza con cierto grado de aproximación. En realidad, todo sistema de referencia está relacionado con ciertos cuerpos y en la naturaleza todos los cuerpos, en mayor o menor grado están en interacción entre sí. Luego, es imposible indicar sistemas de referencia que sean rigurosamente inerciales. Sólo de forma experimental podemos decir si el sistema de referencia es inercial.

La práctica muestra que el sistema de referencia relacionado con la Tierra puede considerarse aproximadamente inercial. La aceleración debido a la rotación sobre su eje es  $0.033 \text{ m / s}^2$  aproximadamente. La rotación de la Tierra no influye prácticamente sobre las reacciones químicas, los fenómenos térmicos y nucleares; así como sobre los procesos electromagnéticos que transcurren en los generadores, motores, transformadores, receptores y transmisores de radio. Tampoco influye sobre la propagación de las ondas electromagnéticas, ni sobre los fenómenos

luminosos y acústicos. En esta aproximación el sistema de referencia ligado a la Tierra es inercial. (Yavorski-Pinski., 1983, pp. 40-41).

Por otro lado, observando de noche la bóveda celeste vemos que todo el sistema de estrellas gira alrededor de un eje que pasa por la estrella Polar y el centro de la Tierra. Además, los planetas realizan por la bóveda celeste movimientos complicados. Moviéndose en cierta dirección, algunos planetas pronto se paran, a continuación se desplazan hacia atrás y, luego trazando un lazo, comienzan a moverse en la dirección inicial. Aristóteles, Ptolomeo y otros investigadores ni siquiera intentaron explicar esos movimientos. Copérnico, Galileo y Kepler resolvieron este problema ligando el sistema de referencia no con la Tierra, sino con el Sol. El sistema heliocéntrico es más inercial que el sistema geocéntrico de referencia.

Sin embargo, si el movimiento de los objetos toma bastante tiempo o las distancias son muy grandes, nos damos cuenta de que sólo tenemos aproximaciones a un sistema inercial. El experimento del péndulo de Foucault es una prueba visible de la rotación de la Tierra. Como el Sol gira alrededor de nuestra galaxia, los astrónomos toman como base un sistema de referencia relacionado con las estrellas más lejanas. Tal sistema de referencia es el más inercial de todos los posibles.

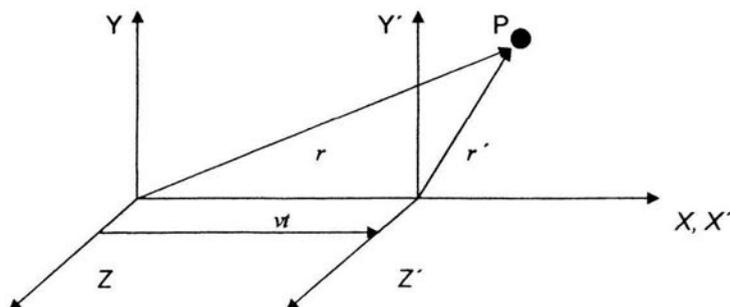
## 2 ECUACIONES DE TRANSFORMACIÓN DE GALILEO.

Consideremos dos observadores  $O$  y  $O'$  que se mueven, uno con respecto al otro, con movimiento de traslación uniforme. Así, el observador  $O$  ve al observador  $O'$

moviéndose con velocidad  $V$  mientras que  $O'$  ve a  $O$  moviéndose con velocidad  $-$

$V$ . Aquí nos interesa comparar las descripciones de movimiento de un objeto, como, por ejemplo, cuando un observador se encuentra en una plataforma de una estación del ferrocarril y el otro está situado en un tren que se desplaza en línea recta con velocidad constante con respecto a la plataforma, y ambos observadores están mirando el vuelo de un avión que pasa por encima de ellos.

Construyamos dos sistemas de coordenadas:  $(x, y, z)$  en el sistema  $S$  y  $(x', y', z')$  en el sistema de referencia  $S'$ . Si escogemos, por simplicidad, los ejes  $X$  y  $X'$  a lo largo de la línea del movimiento relativo y los ejes  $Y, Z$  e  $Y', Z'$  paralelos entre sí; los ejes de coordenadas permanecerán siempre paralelos debido a la ausencia de rotación relativa.



Consideremos ahora un cuerpo (por ejemplo, un avión en pleno vuelo) localizado en el punto P. Sean  $\vec{r}$  y  $\vec{r}'$  los vectores de posición del cuerpo respecto a los sistemas de referencia S y S'. Los vectores de posición están relacionados de la siguiente forma:

$$\vec{r}' = \vec{r} - \vec{v} t ,$$

donde  $\vec{v} t$  es la distancia que separa ambos sistemas de referencia en el instante t. La ecuación vectorial puede expresarse en sus tres componentes, tomando en cuenta el hecho de que la velocidad relativa  $\vec{v}$  es paralela al eje OX'; se tiene:

$$x' = x - vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

Sólo nos falta determinar cómo relacionamos los tiempos t y t', medidos en dos sistemas de referencia. Para eso sincronizamos los relojes poniendo t=t'=0 en el momento en que los dos sistemas de coordenadas coinciden; el sentido común nos indica que los dos relojes marcarán siempre el mismo tiempo. Es decir, suponemos que las mediciones de tiempo son independientes del movimiento del observador.

Al conjunto de ecuaciones:

$$X' = x - vt$$

$$Y' = y$$

$$Z' = z$$

$$t' = t$$

se les conoce como transformaciones de Galileo. Estas ecuaciones permiten relacionar entre sí las posiciones y tiempos de cierto cuerpo en dos sistemas inerciales diferentes, cuando estos sistemas se encuentran en movimiento relativo de traslación uniforme con velocidades mucho menores que la velocidad de la luz.

### 3. SUMA CLÁSICA DE VELOCIDADES.

Supongamos que en el intervalo de tiempo  $\Delta t$  el cuerpo sufre un cambio de posición

$\vec{\Delta r}$  con respecto al observador O y  $\vec{\Delta r}'$  con respecto al observador O'. Debido al movimiento relativo de los observadores, estos desplazamientos quedan

relacionados como  $\vec{\Delta r}' = \vec{\Delta r} - v\Delta t$

Sea  $\vec{u} = \frac{\vec{\Delta r}}{\Delta t}$  la velocidad del cuerpo con respecto al observador O y

$\vec{u}' = \frac{\vec{\Delta r}'}{\Delta t}$  la velocidad del cuerpo con respecto al observador O'. Dividiendo los

dos miembros de la igualdad  $\vec{\Delta r}' = \vec{\Delta r} - \vec{v} \Delta t$  por  $\Delta t$ , obtenemos  $\vec{u}' = \vec{u} - \vec{v}$ ,

ya que  $\Delta t' = \Delta t$ . La ecuación anterior se puede escribir en sus tres componentes:

$$U'_{x'} = u_x - v$$

$$U'_{y'} = u_y$$

$$U'_{z'} = u_z$$

Esta ecuación es la suma clásica de velocidades de Galileo. La ecuación nos sirve para comparar la velocidad de un cuerpo medida por los observadores en movimiento relativo de traslación uniforme, cuando la velocidad relativa  $\vec{v}$  es mucho menor que la velocidad de la luz.

4. INVARIANCIA DE LA DISTANCIA ENTRE DOS PUNTOS, LOS INTERVALOS DE TIEMPO Y LAS VELOCIDADES RELATIVAS CON RESPECTO A LAS TRANSFORMACIONES DE GALILEO.

Consideremos dos cuerpos. Si en el sistema de referencia S sus posiciones son  $(x_1, y_1, z_1)$  y  $(x_2, y_2, z_2)$ , entonces en el sistema de referencia S' esas posiciones son  $(x'_1, y'_1, z'_1)$  y  $(x'_2, y'_2, z'_2)$  que están relacionadas por la misma transformación de Galileo:

$$\begin{aligned}x'_1 &= x_1 - vt & x'_2 &= x_2 - vt \\y'_1 &= y_1 & y'_2 &= y_2 \\z'_1 &= z_1 & z'_2 &= z_2 \\t'_1 &= t_1 & t'_2 &= t_2\end{aligned}$$

El cuadrado de la distancia entre dos puntos es, por el teorema de Pitágoras,

$$d_{21}^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2$$

en el sistema de referencia S. En el sistema de referencia S', esta ecuación se convierte en:

$$d_{21}^2 = (x'_2 - x'_1)^2 + (y'_2 - y'_1)^2 + (z'_2 - z'_1)^2$$

Usando las ecuaciones de transformación de Galileo se concluye que

$$d_{21}^2 = d_{21}^2.$$

Por otro lado, los intervalos de tiempo entre dos observaciones en los instantes  $t_1$  y  $t_2$  son:

$$t_2' - t_1' = t_2 - t_1; \quad \Delta t' = \Delta t,$$

ya que se dio por supuesto que  $t' = t$ .

Además, las velocidades relativas son invariantes. (Lozano, J. M., 1996, pp. 93-98)

$$u_2' = u_2 - v$$

$$u_1' = u_1 - v$$

$$u_2' - u_1' = u_2 - u_1$$

$$\Delta u' = \Delta u.$$

En el capítulo IV de este trabajo se demuestra que la distancia entre dos puntos, los intervalos de tiempo y las velocidades relativas no son invariantes con respecto a las transformaciones de Galileo.

## 1. CONSERVACIÓN DEL MOMENTO LINEAL EN DIFERENTES SISTEMAS DE REFERENCIA INERCIALES.

Consideremos un laboratorio fijo en la Tierra como un sistema de referencia inercial, es decir, que en él se cumplen las leyes de la mecánica newtoniana. Entre ellas tenemos la ley de la conservación del momento lineal:

*“Si la resultante de las fuerzas externas que actúan sobre el sistema de cuerpos es nula, el momento lineal total del sistema permanece constante”,*

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + m_3 \vec{v}_3 + \dots \pm m_n \vec{v}_n = k$$

Demostremos que si el momento lineal se conserva en un laboratorio terrestre (sistema S), también se conserva en un tren que se mueve horizontalmente con velocidad constante.

Supongamos que un observador en el tren realiza un simple experimento de choque entre dos objetos de masas  $m_1$  y  $m_2$ . Supongamos que todas las velocidades son paralelas en la dirección X. El cuerpo  $m_1$  tiene una velocidad  $u_1'$  antes de la colisión y una velocidad  $U_1'$  después de ella;  $m_2$  tiene las velocidades  $u_2'$  y  $U_2'$  respectivamente. Los apóstrofes indican que estas velocidades se miden con respecto al observador en el tren (sistema de referencia S').

Para un observador en la Tierra que sigue el experimento, el objeto  $m_1$  tiene la velocidad  $u_1 = u_1' + v$  y el objeto  $m_2$  tiene la velocidad  $u_2 = u_2' + v$  (1)

donde:  $v$  es la velocidad relativa constante del tren con respecto al suelo. Como el momento lineal se conserva en el sistema de referencia del suelo, se tendrá:

$$m_1 u_1 + m_2 u_2 = m_1 U_1 + m_2 U_2 \quad (2)$$

La sustitución de la ecuación (1) en la ecuación (2) da:

$$m_1 u_1 + m_1 v + m_2 u_2 + m_2 v = m_1 U_1 + m_1 v + m_2 U_2 + m_2 v$$

donde se utilizaron las ecuaciones  $U_1 = U_1' + v$  y  $U_2 = U_2' + v$ . Suprimiendo los términos en  $m v$ , se tiene:  $m_1 u_1 + m_2 u_2 = m_1 U_1 + m_2 U_2$  (3)

Esta última ecuación expresa la conservación del momento lineal en el sistema de referencia del tren.

La ecuación (3) es igual a la ecuación (2) y, por consiguiente, ambos observadores inerciales verifican la Ley de la conservación del momento lineal. De lo anterior, podemos generalizar que la ley de la conservación del momento lineal permanece invariante para todos los sistemas inerciales que se mueven los unos con respecto a los otros a velocidad constante.

2. RELACIÓN ENTRE LA FUERZA MEDIDA POR DOS OBSERVADORES INERCIALES MOVIÉNDOSE CON UNA VELOCIDAD RELATIVA CONSTANTE  $V$ .

Supongamos que ambos observadores miden la misma masa para un cuerpo que observan en movimiento, suposición basada en la experiencia, siempre que la velocidad relativa  $\vec{v}$  sea pequeña comparada con la velocidad de la luz. Si  $\vec{u}$  y  $\vec{u}'$  son las velocidades del cuerpo con respecto a los observadores O y O', estas velocidades están relacionadas por la ecuación.

$$\vec{u} = \vec{u}' + \vec{v}.$$

Supongamos que las velocidades del cuerpo medidas por O y O' varían con el tiempo. Sean  $\vec{\Delta u}$  y  $\vec{\Delta u}'$  los cambios de velocidad del cuerpo medidos por O y O', respectivamente, en el intervalo  $\Delta t$ , que por hipótesis hemos supuesto es el mismo para ambos observadores. Como la velocidad  $\vec{v}$  es constante, los cambios de velocidad  $\vec{\Delta u}$  y  $\vec{\Delta u}'$  deben ser iguales, o sea:

$$\vec{\Delta u} = \vec{\Delta u}';$$

luego, dividiendo por el intervalo  $\Delta t$ ,

$$\frac{\vec{\Delta u}'}{\Delta t} = \frac{\vec{\Delta u}}{\Delta t}$$

pero  $\frac{\vec{\Delta u}'}{\Delta t} = \vec{a}'$ , la aceleración del cuerpo respecto a O' y  $\frac{\vec{\Delta u}}{\Delta t} = \vec{a}$ , la aceleración del cuerpo respecto a O. Luego,

$$\vec{a}' = \vec{a}$$

Este resultado nos indica que cuando dos observadores están en movimiento relativo de traslación uniforme, los dos miden la misma aceleración de cualquier cuerpo en movimiento. Se dice que la aceleración es una invariante con respecto a una transformación galileana.

Según la segunda Ley de Newton, la fuerza es,  $\vec{F} = m\vec{a}$  y  $\vec{F}' = m\vec{a}'$ . Como

$\vec{a}' = \vec{a}$ , se concluye que:

$$\vec{F}' = \vec{F}$$

Es decir, ambos observadores inerciales miden la misma fuerza sobre el cuerpo cuando comparan sus medidas. La fuerza es invariante ante una transformación de Galileo. (Lozano, J. M., 1996, pp. 97-98)

### 3. CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA MECÁNICA EN LOS SISTEMAS DE REFERENCIA INERCIALES EN MOVIMIENTO RELATIVO DE TRASLACIÓN UNIFORME.

Consideremos dos observadores O y O' que observan la colisión elástica de dos cuerpos de masas  $m_1$  y  $m_2$ . Por comodidad supongamos que la colisión se lleva a cabo en una dimensión. El observador O se encuentra en la orilla de la vía. Ambos observadores acuerdan medir el cambio de la energía cinética durante el choque de los cuerpos.

Observador terrestre (S):



Observador en el tren (S'):



Las velocidades de los cuerpos en ambos sistemas de referencia están relacionadas por la transformación clásica de velocidades de Galileo.

$$u_1' = u_1 - v$$

$$u_2' = u_2 - v$$

$$v_1' = v_1 - v$$

$$v_2' = v_2 - v$$

Se demostrará que el cambio de la energía cinética durante una colisión elástica es la misma en los sistemas inerciales en movimiento relativo de traslación uniforme.

Para el observador O en el sistema de la Tierra se tiene:

$$k_i = \frac{1}{2} m_1 u_1^2 + \frac{1}{2} m_2 u_2^2$$

$$k_f = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2$$

$$\Delta k = k_f - k_i = \left( \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \right) - \left( \frac{1}{2} m_1 u_1^2 + \frac{1}{2} m_2 u_2^2 \right).$$

Para el observador O' en el sistema del tren en movimiento se tiene:

$$k_i' = \frac{1}{2} m_1 (u_1 - v)^2 + \frac{1}{2} m_2 (u_2 - v)^2$$

$$k_f' = \frac{1}{2} m_1 (v_1 - v)^2 + \frac{1}{2} m_2 (v_2 - v)^2$$

$$\Delta k' = k_f' - k_i'$$

$$\Delta k' = \left( \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \right) - \left( \frac{1}{2} m_1 u_1^2 + \frac{1}{2} m_2 u_2^2 \right) - v[(m_1 v_1 + m_2 v_2) - (m_1 u_1 + m_2 u_2)]$$

$$\Delta k' = \Delta k - v[(m_1 v_1 + m_2 v_2) - (m_1 u_1 + m_2 u_2)].$$

El principio de conservación del momento lineal nos dice que para cualquier tipo de colisión entre dos cuerpos se tiene que:

$$m_1 u_1 + m_2 u_2 = m_1 v_1 + m_2 v_2;$$

luego, la suma de los términos contenidos en el corchete de  $\Delta k'$  es cero. Por lo tanto, se sigue que  $\Delta k' = \Delta k$ .

Cuando la energía potencial depende únicamente de la distancia de los cuerpos en interacción, la energía potencial que miden los observadores inerciales en movimiento relativo es la misma ya que la distancia entre los cuerpos es invariante bajo una transformación galileana.

De lo anterior, podemos decir que el cambio en la energía total  $\Delta(k+U)$ , es una cantidad física invariante. Es decir, la ley de la conservación de la energía mecánica es válida en todos los sistemas inerciales.

Resumiendo, en la mecánica clásica, las posiciones y velocidades de los cuerpos son cantidades relativas, ya que dichas propiedades son distintas en diferentes sistemas de referencia. Las posiciones y velocidades medidas en diferentes sistemas de referencia, se relacionan por medio de la transformación de Galileo y la regla de adición de velocidades; mientras que la distancia entre dos puntos, los intervalos de tiempo y las velocidades relativas son invariantes con respecto a las transformaciones galileanas.

Por otra parte, la masa de los cuerpos es una propiedad de los mismos y no depende del estado de movimiento del observador. Las fuerzas entre objetos dependen sólo de las posiciones o de las velocidades relativas entre los objetos que interactúan y, al ser invariantes, obtenemos que la ley fundamental de la mecánica newtoniana, que

establece que en un sistema de referencia inercial  $\vec{F} = m \vec{a}$ , es invariante frente a las transformaciones de Galileo. También son invariantes las leyes de conservación de la energía y del momento lineal. Este es el principio de relatividad de Galileo, que nos dice que las leyes de la mecánica son iguales en todos los sistemas inerciales.

Una consecuencia importante del análisis anterior es que ningún experimento mecánico efectuado totalmente dentro de un sistema inercial, puede indicar al observador cuál es su estado de movimiento con relación a cualquier otro sistema inercial. Por ejemplo, si un jugador de billar va en un vagón de un tren que se desplaza uniformemente a lo largo de una vía recta horizontal, no podrá decir cuál es el movimiento del tren con respecto a Tierra a partir del comportamiento de las bolas de billar. Por su puesto se puede saber cual es la velocidad relativa entre dos sistemas si se comparan las mediciones obtenidas en ellos — es decir, se pueden comparar los datos que diferentes observadores toman de un mismo suceso, o bien se puede observar por la ventana — pero en estos casos no se ha deducido la velocidad relativa a partir de observaciones confinadas a un solo sistema.

## **CAPITULO II. LA ELECTRODINÁMICA ANTES DE LORENTZ.**

### **a) ÓPTICA: TEORÍA ONDULATORIA Y TEORÍA CORPUSCULAR.**

La luz tiene un papel fundamental en la teoría de la relatividad, un papel que se puede apreciar mejor si conocemos algunas de sus características.

La ciencia de la óptica se formaliza a partir de René Descartes (1591-1650). Su obra *Dioptrics* de 1638 contiene las leyes fundamentales de la reflexión y refracción. La ley de la reflexión se conocía desde la antigüedad y la ley de la refracción fue descubierta experimentalmente por W. Snell (1591-1626) alrededor de 1618. Debe mencionarse que Descartes desarrolló la idea del éter como elemento donde se propaga la luz.

En el siglo XVII la teoría ondulatoria fue propuesta en principio por Robert Hooke (1635-1703) en su *Micrographia* de 1665, y posteriormente por el físico holandés Christian Huygens (1629-1695) en su *Tratado sobre la luz* de 1678. Huygens pensaba que la luz era una onda, análoga a las olas en la superficie del agua o las ondas sonoras en el aire. Pero si la luz es realmente una onda, es decir la vibración de algún medio, ¿Cuál es el equivalente del agua o del aire?, ¿Qué medio transporta una onda luminosa?. Para este propósito se tiene que suponer la existencia de un medio que penetra todos los cuerpos transparentes, llena y permea todo el universo. Este medio fue el éter lumínico; aunque no existiera observación directa de tal medio.

El modelo corpuscular de la luz fue apoyado por Isaac Newton (1642-1727); en éste se concebía a la luz como un haz de partículas, incontables y pequeñísimas que emanaban de la fuente luminosa, las que eran reflejadas por varios objetos hasta que estimulaban el órgano de la visión. Newton permaneció ambivalente por un gran tiempo acerca de la naturaleza real de la luz. ¿Era corpuscular, como un flujo de partículas, como algunos sostenían? ¿o era la luz una onda en un medio que todo lo penetraba, el éter?. Es de destacar que Newton aceptaba también –en lo referente a los fenómenos ópticos- la existencia de un éter, pero no como un medio necesario para la propagación de la luz, sino como un medio que interaccionaba con los corpúsculos luminosos para así producir los fenómenos de refracción y los llamados anillos de Newton. Este fenómeno, interpretado usualmente como interferencia de ondas era explicado por Newton como resultado de una distribución inhomogénea de los corpúsculos de luz.

Newton también pensó que una teoría ondulatoria no podía explicar la polarización de la luz; la explicaba suponiendo que el rayo tenía "lados" de modo que sus propiedades dependían de su orientación respecto a la dirección de propagación del rayo. Erasmus Bartholinus, científico danés, descubrió en 1669 que los cristales de espato de Islandia (calcita) tenían la propiedad de dividir un rayo de luz en dos.

Huygens postuló que el éter era un medio donde se propagaba la luz, consistente en partículas que chocan unas con otras, haciendo que se propague una onda de la fuente . Con su modelo, Huygens concluyó correctamente que la velocidad de la luz

era menor en medios más densos que el aire. Explicó las leyes de la reflexión y refracción, e incluso explicó la doble refracción de la calcita.

Aunque los modelos ondulatorio y corpuscular predicen la misma ley de reflexión y la misma forma algebraica para la refracción, se encuentra una diferencia significativa entre estos modelos. El modelo corpuscular predice que la velocidad de la luz es mayor en el agua o vidrio que la velocidad de la luz en el aire. El modelo ondulatorio predice lo contrario. Para seleccionar el modelo correcto era necesario medir la velocidad de la luz en el agua o vidrio. Pero esta medición llegó bastante tarde, cuando el físico francés J. L. Foucault (1819-1868) en 1850 midió la velocidad de la luz en el agua, encontrando un valor aproximado de tres cuartas partes de su valor en el aire. Pero para esa época, el modelo ondulatorio estaba ya bien establecido.

### *ABERRACIÓN ESTELAR*

En 1728, James Bradley (profesor de astronomía en Oxford) publicó los resultados de sus observaciones precisas del cambio aparentemente estacional en la posición de las estrellas, en particular la estrella llamada gamma Draconis. Observó que una estrella situada en el cenit parecía moverse en una órbita casi circular con un período de un año, teniendo un diámetro angular de unos 40.5 segundos de arco.

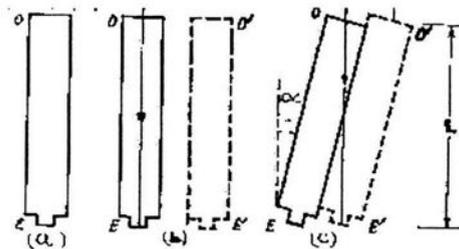
También observó que las estrellas en otra posición tenían movimiento algo semejante, en general elíptico. Este fenómeno observado por Bradley se denominó aberración estelar.

Se puede decir que la aberración estelar es un fenómeno que depende tanto de los cambios en la posición de la Tierra alrededor del Sol, como del hecho de que la velocidad de propagación de la luz es finita. Este fenómeno no está relacionado con el movimiento verdadero de la estrella, si es que lo tiene.

La aberración es el ángulo entre la dirección aparente y la dirección real en que se encuentra una estrella; depende de la relación entre la velocidad de la luz y la de la Tierra; es máxima cuando la dirección en que se encuentra la estrella es perpendicular a la del movimiento de la Tierra.

La figura (a) representa rayos de luz que descienden de una estrella lejana y el rayo  $c$  que atraviesa el objetivo de un telescopio en  $O$  para llegar hasta el ocular  $E$ . La luz se propaga en línea recta a lo largo del tubo del telescopio y vemos la estrella. Supongamos que el telescopio se mueve rápidamente hacia la derecha, como en la figura (b), de modo que cuando la luz que ha penetrado por  $O$  alcanza  $E$ , el telescopio se ha movido de  $OE$  a  $O'E'$ . La luz hubiera ido a parar a la pared del tubo y no habríamos visto la estrella. Para verla, es necesario inclinar el telescopio como en la figura (C). Luego, la luz que atravesó el objetivo en  $O$  sigue en línea recta como antes, pero ahora, en el instante en que la luz alcanza el fondo del tubo, el telescopio

ha pasado por  $O'E'$  y la luz incide sobre el ocular a quien la observamos. Si la distancia vertical que recorre la luz a lo largo del telescopio es  $L$ , para ello requiere un tiempo  $t = L/c$ . Durante este tiempo, el telescopio avanza la distancia  $s = vt = vL/c$ , donde  $v$  es la velocidad del telescopio. Luego, el telescopio debe inclinarse un ángulo  $\alpha$ , donde  $\tan \alpha = \frac{v}{c}$



La Tierra gira en torno al Sol con una rapidez aproximada de 30 km/seg. Por lo tanto, cuando se apunta a las estrellas en la posición más ventajosa, el telescopio debe inclinarse un ángulo aproximado de 20 segundos de arco para compensar el efecto de la aberración de la luz.

¿Cuál teoría de la luz explica la aberración estelar? La explicación que dio Bradley a su descubrimiento se basaba en el modelo corpuscular. Este modelo proporciona una explicación inmediata; es exactamente como la analogía de la lluvia que cae. Si no sopla el viento, las gotas caen verticalmente y una persona quieta con un paraguas directamente sobre ella no se mojará. Si la persona corre, manteniendo el

paraguas en la misma posición, la parte delantera de su cuerpo se mojará. Respecto a la persona en movimiento, las gotas de lluvia no caen exactamente verticales, luego tiene que inclinar su paraguas, esto podría llamarse la aberración de las gotas de lluvia.

En el siglo XIX se suponía que el éter era el medio que transmitía las ondas luminosas. En el modelo ondulatorio de la luz, el fenómeno de la aberración estelar nos muestra que la Tierra no arrastra al éter. Porque si fuera arrastrado, entonces, éste estaría en reposo con respecto a la Tierra y el telescopio no tendría que inclinarse, luego no habría aberración. Entonces, si hay éter, la Tierra no lo arrastra consigo, sino que el planeta se mueve libremente a través de él. Por otro lado, si la luz se propaga en un medio –el del éter-, entonces el éter penetra libremente a toda la materia, como es el caso del telescopio.

Por otro lado, la observación de la aberración de la luz de las estrellas cuando la Tierra gira en torno del Sol nos proporciona el experimento sobresaliente para probar que la Tierra realmente gira en torno 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.

## THOMAS YOUNG

A principios del siglo XIX, la teoría ondulatoria de la luz renació con los trabajos experimentales del médico inglés Thomas Young (1773-1829). En sus artículos leídos ante la Royal Society en los años 1801 a 1803, pone de relieve la teoría ondulatoria y añade un nuevo concepto, la interferencia de ondas viajeras. Al respecto nos dice: Cuando dos ondas de diferentes orígenes coinciden perfectamente en una dirección dada, su efecto conjunto es una combinación de los movimientos que pertenecen a cada uno. (Hecht-Zajac, 1977, pp. 5-6)

El argumento de T. Young a favor de la teoría ondulatoria era: para explicar el hecho de que la velocidad de propagación de la luz es la misma que parte de diferentes fuentes, la teoría corpuscular tiene que suponer, en forma no convincente, que las partículas son emitidas con la misma velocidad por fuentes débiles (como las chispas) y por fuentes intensas (como el Sol). En el modelo ondulatorio esta dificultad no aparece, ya que la velocidad de propagación es una propiedad del medio y es independiente de la fuente. Young agregaba que el modelo ondulatorio explicaba en forma más natural la reflexión y la refracción simultáneas en una interfase. (Arons, A., 1970, pp. 660-61)

También hizo un análisis matemático de la interferencia de ondas e interpretó los anillos de Newton como un fenómeno de interferencia, donde, debido a la diferencia en la trayectoria introducida por el desplazamiento hacia un lado y hacia otro a través

de la película, la luz reflejada de la superficie anterior y posterior interfería destructiva o constructivamente, dependiendo de la anchura local de la película.

En su artículo "Of the Analogy between Light and Sound" proponía la existencia de un éter. La diferente velocidad que la luz tiene en medios distintos la explicaba con base en la diferencia existente entre las densidades del éter en dichos medios.

En defensa de una teoría ondulatoria de la luz, Young trató de dar una explicación al fenómeno de la aberración estelar. Creía que el éter luminoso impregnaba a toda la materia con pequeña o nula resistencia. Es decir, la Tierra no arrastra consigo al éter.

Desafortunadamente sus trabajos no fueron comprendidos por la comunidad científica inglesa que seguía creyendo en el modelo corpuscular de Newton.

#### *ARAGO, FRESNEL, STOKES*

Al empezar el siglo XIX, cuando empezaba a cimentarse el modelo ondulatorio de la luz con Thomas Young, el modelo corpuscular de la luz tenía bastantes seguidores. Con base en la teoría corpuscular de la luz, el físico francés, D. F. J. Arago (1786-1853) llegó a la conclusión de que la aberración estelar en un medio ópticamente denso, como la lente de un telescopio, sería diferente según que la luz procedente de una estrella pasase a través del cristal en la misma dirección y sentido que el movimiento de la Tierra o en sentido opuesto.

En 1810, Arago llevó a cabo el experimento enfocando una estrella en el horizonte. El telescopio quedó fijo en la posición de enfoque y la estrella fue periódicamente observada durante todo el año. El resultado fue nulo; no se observaba ninguna diferencia en los ángulos de desviación. Es decir, se encontró que la luz estelar era siempre refractada como si la Tierra estuviera en reposo y la dirección aparente del rayo fuera considerada como su dirección verdadera.

Años más tarde, cuando Arago conoció los trabajos de su compatriota Agustín Jean Fresnel (1788-1827) sobre la teoría ondulatoria de la luz, le informó de sus experimentos y de su incapacidad para encontrarles una explicación con base en la teoría corpuscular. La explicación que da Fresnel al experimento de Arago, consistía en suponer que la densidad del éter de todo cuerpo es proporcional al cuadrado de su índice de refracción,  $n^2$ , y que cuando un cuerpo está en movimiento, transporta dentro de él parte del éter. A partir de estas hipótesis dedujo el denominado

coeficiente de arrastre de Fresnel  $1 - \frac{1}{n^2}$ .

Una consecuencia inmediata de la existencia de este coeficiente es que la velocidad (con respecto al éter) de la luz en un medio en movimiento, como el lente del telescopio, viene dada por la ecuación:

$$C_p = \frac{C}{n} + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)v$$

Si  $n = 1$ , entonces la velocidad en el lente  $C_p$  es igual a  $c$ , la velocidad de la luz en el éter.

Fresnel también mostró que su coeficiente de arrastre producía el mismo resultado en casos más generales de refracción, siempre que la velocidad del medio refractante fuera mucho menor que la velocidad de la luz. De lo anterior, Fresnel infirió que la aberración estelar no cambiaría cuando fuera vista a través de un telescopio lleno de agua. Muchos años después, en 1871, sir George Airy verificó experimentalmente lo dicho por Fresnel.

La trascendencia del coeficiente de arrastre residió durante algunos años en el hecho que permitía explicar los experimentos de Arago. Sin embargo, su alcance era limitado en tanto que había sido ideado por Fresnel para explicar en forma más o menos ad hoc los experimentos de Arago. Esta situación cambió cuando en 1851 Fizeau confirmó la utilidad del coeficiente de arrastre mediante un experimento independiente. A partir de entonces, el coeficiente de Fresnel era un factor que toda teoría futura debía explicar. Este sería de hecho uno de los principales problemas que Lorentz intentaría resolver años más tarde, desde el punto de vista de la teoría electromagnética de la luz.

Young, Arago y Fresnel creían que con la teoría ondulatoria de la luz no se podía explicar el fenómeno de la aberración estelar si se suponía que la Tierra arrastraba completamente el éter.

Sin embargo, el físico británico C. G. Stokes no aceptó este punto de vista y en 1845 publicó su trabajo en el que suponía que el éter era arrastrado por la Tierra, de la misma forma que capas de un fluido son arrastradas debido a la fricción, cuando el

cuerpo pasa a través de él. Con el modelo de Stokes, la velocidad del éter en la superficie de la Tierra era la misma que la velocidad de ésta, para luego ir disminuyendo al alejarse de ella. Lejos de la Tierra se suponía que el éter estaba en reposo.

Si la Tierra en su movimiento no produce remolinos en el éter, la aberración puede explicarse como la velocidad del éter a través del cual se propaga el rayo de luz. El efecto consiste simplemente en la inclinación de las ondas incidentes, según un ángulo que es el ángulo de aberración. Con este modelo se explica también el experimento de Arago, ya que el lente está en reposo en el éter, y por tanto no cabe esperar ningún efecto especial.

Lorentz no estuvo de acuerdo con la teoría de Stokes, porque no explicaba el coeficiente de arrastre de Fresnel, tal como lo pone de manifiesto el experimento de Fizeau y porque pensaba que es imposible que el éter fuese un fluido incompresible y que se moviera con la misma rapidez que en la superficie de la Tierra sin que en él se produzcan remolinos, borrando de paso la explicación de la aberración estelar.

#### *EL EXPERIMENTO DE MICHELSON-MORLEY*

Cuando Michelson planeó y realizó su primer experimento en 1881, la explicación que Fresnel había dado para la aberración estelar era generalmente la más aceptada por la comunidad científica. La teoría de Fresnel del coeficiente de arrastre del éter

predecía que ningún experimento óptico podría detectar el movimiento a través del éter si el aparato utilizado sólo era capaz de detectar efectos de primer orden en  $\frac{v}{c}$ ,

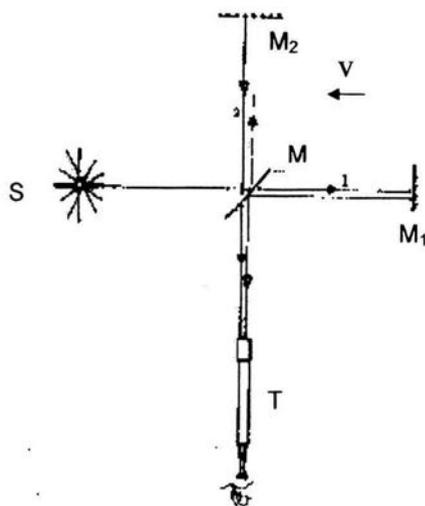
donde  $V$  es la supuesta velocidad con respecto al éter, cuyo valor aproximado es el de la velocidad de la Tierra alrededor del Sol, y  $c$  es la velocidad de la luz con relación al éter.

La idea crucial del experimento fue sugerida por James Clerk Maxwell, cuando en 1879, en una carta enviada a D. P. Todd de la U.S. Nautical Almanac Office of Washington, preguntaba si era posible la medición de la velocidad del sistema solar a través del éter mediante la observación de los eclipses de las lunas de Júpiter. Maxwell había señalado que, en principio, el éter podía ser detectado a través del hecho de que un rayo de luz emitido por una fuente en movimiento tardaría tiempos diferentes en el camino de ida y en el de vuelta, y añadió que el efecto sólo sería perceptible a través de un método sensible al segundo orden en  $\left(\frac{v}{c}\right)$ .

Albert Abraham Michelson (1852-1931), físico americano e instructor naval en esa época, leyó la carta de Maxwell y aceptó el reto de medir la cantidad  $\left(\frac{v}{c}\right)^2$ . Para lograr su objetivo inventó un interferómetro con una elevada sensibilidad.

La idea de Michelson era enviar simultáneamente dos rayos de luz, procedentes de una misma fuente, y en fase, en direcciones perpendiculares, hacerles recorrer distancias iguales y recogerlos, tras una reflexión, en un punto en común. Las fases

de los dos rayos de luz se podían comparar estudiando su interferencia. Uno de los rayos tardaría más tiempo que el otro, dependiendo de la orientación del dispositivo con respecto al éter. Luego girando todo el aparato sobre una fuente de mercurio y variando así la dirección de las trayectorias de la luz podía retardar un rayo con respecto al otro y cambiar por tanto su fase relativa.



*Versión simplificada del interferómetro de Michelson en la que se aprecia que el haz luminoso proveniente de la fuente  $S$  se divide en dos en el espejo semirreflector  $M$ . Los dos haces originados se reflejan en los espejos 1 y 2, respectivamente, para volver al espejo semirreflector. Finalmente, los haces llegan al telescopio  $T$ , donde se interfieren, produciendo un espectro de interferencia. En esta figura,  $v$  representa la*

*velocidad del éter con respecto al interferómetro.* (Resnik Robert, 1981, pp 17).

La primera vez que Michelson hizo el experimento (en Postdam, Alemania, en 1881), no se observó ningún desplazamiento del patrón de interferencias, ni tampoco ningún viento del éter según la teoría de Fresnel. Michelson sacó como conclusión que la teoría de Stokes era la correcta. Sin embargo, H. A. Lorentz revisó los fundamentos teóricos por si hubiera alguna equivocación, ya que el resultado supondría un golpe para la teoría de Fresnel, que explicaba el resultado experimental de Fizeau. Descubrió que Michelson se había equivocado en los cálculos del corrimiento de fase y que el experimento no era lo suficientemente preciso para detectar un desplazamiento de la magnitud prevista. Además sugirió que se alargaran los brazos del aparato para conseguir la precisión necesaria.

En 1887, Michelson con la ayuda de Edward Williams Morley (1838-1923) repitió el experimento en Chicago, esta vez con atención esmerada. El resultado fue otra vez negativo, sólo que ahora no había manera de impugnar el experimento, que fue luego repetido muchas veces en condiciones diferentes. La teoría del arrastre del éter estaba en apuros. La teoría de Stokes no explicaba el coeficiente de Fresnel, ni la teoría de Fresnel explicaba el experimento de Michelson.

El experimento de Michelson-Morley debió ser frustrante, porque si pensamos que la luz es una onda propagándose en el éter, entonces el experimento encaminado a revelar el movimiento de la Tierra a través de este medio conduce a la inexistencia del éter. Por otro lado, al considerar la teoría ondulatoria, nos encontramos con un

conflicto aparente entre los resultados de la aberración estelar y el experimento de Michelson-Morley. La aberración estelar tiene validez si la Tierra se mueve respecto al éter y el experimento de Michelson-Morley implica que la Tierra no se mueve respecto a éste.

Aparte del experimento de Michelson, se realizaron otros experimentos de carácter eléctrico con el fin de descubrir el viento del éter. Estos experimentos no alteraron en esencia la situación, sino que confirmaron independientemente el resultado de Michelson. El experimento más conocido fue realizado a instancias de Fitzgerald por Trouton y Noble.

El experimento de Trouton y Noble se proponía ver si un condensador cargado manifestaba alguna tendencia a la rotación. No descubrieron ninguna rotación del condensador y como consecuencia no descubrieron pruebas del viento del éter. Oliver Lodge realizó un experimento donde trató de comprobar si un cuerpo giratorio muy electrizado o magnetizado alteraba la velocidad de un rayo de luz que pasara cerca de él. Comparó los haces luminosos que rodeaban al cuerpo por lados opuestos. No se observó ninguna diferencia de fase.

Una explicación al resultado nulo del experimento de Michelson, la dió en 1889 el físico irlandés G. E. Fitzgerald cuando sugirió que el resultado negativo del experimento podía explicarse suponiendo que el brazo del interferómetro se contrae

en un factor  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$  en la dirección del movimiento a través del éter a la velocidad  $v$ . Fitzgerald intentó justificar su hipótesis de contracción indicando que las fuerzas intermoleculares son probablemente de naturaleza eléctrica.

En forma independiente, el físico holandés H. A. Lorentz propuso la hipótesis de la contracción de la longitud. Desarrolló una teoría general de la electrodinámica en la cual suponía que las longitudes de todos los objetos de un sistema moviéndose respecto del éter se contraían en un factor de  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ .

El factor de corrección sólo se aplica a la componente en la dirección del movimiento. El resultado negativo de la experiencia de Michelson-Morley y de los que la continuaron, sirvió de base experimental para reconocer el hecho de que la velocidad de la luz es la misma en todos los sistemas inerciales.

**b) DESARROLLO DE LA ELECTRODINÁMICA: TEORÍAS DE CAMPO Y TEORÍAS DE ACCIÓN A DISTANCIA. FARADAY, WEBER, NEUMANN MAXWELL, HELMOLTZ, HERTZ.**

Si nos preguntan: ¿cómo es posible que un cuerpo electrizado haga que pedacitos de papel se muevan hacia a él?, ¿por qué un imán es capaz de hacer que un trozo de hierro a cierta distancia se mueva?, ¿por qué un cuerpo empuja a otro en vez de penetrar en él?. En realidad no es fácil contestar estas preguntas.

La historia nos dice que ya en la antigua Grecia se hicieron algunas preguntas semejantes a las anteriores. Así, Demócrito nos dice que los cuerpos interactúan por contacto entre sus átomos.

Dando un salto en el tiempo, Descartes propone un sistema donde la materia se identifica con el espacio y supone que no existen fuerzas a distancia. La acción de un cuerpo sobre otro se lleva a cabo a través de un medio universal, un éter formado a su vez de partículas. Para explicar el movimiento establece que parte de la materia es más fluida que el resto, porque está constituida por partículas demasiado pequeñas. El movimiento de un cuerpo provoca la aparición de remolinos en torno al suyo, y estos remolinos arrastran a su paso más materia, aunque en general no sea precisamente en la dirección de la partícula que lo ha provocado. (Berkson cap.2)

Por otra parte, a fines del siglo XVII aparece la ley de la gravitación universal de Isaac Newton (1642-1727). Esta ley matemática nos dice que la intensidad de la

fuerza depende del inverso del cuadrado de la distancia entre los cuerpos. La visión del mundo de Newton es en cierta medida semejante a la de Demócrito. Para Newton el mundo está constituido por corpúsculos sólidos y extensos, por espacio vacío y por la fuerza. Cada corpúsculo puede actuar sobre otros mediante fuerzas atractivas o repulsivas.

Aplicando la ley de gravitación, Newton pudo calcular el movimiento de los planetas con gran aproximación y deducir correctamente las leyes descubiertas por Kepler. En este sentido, la teoría de Newton era muy superior, en la predicción de nuevos resultados, a cualquier otra teoría precedente y por eso se convirtió en un punto de referencia para cualquier otra teoría posterior.

El concepto de acción a distancia se le atribuye a Newton, pero probablemente el mismo Newton no creía en la acción a distancia. Así, en la tercera carta a Bentley (del 25 de febrero de 1692) escribió lo siguiente:

"Es inconcebible que la materia inanimada y bruta puede operar e influir, sin la mediación de alguna otra cosa que no sea material, sobre la materia sin un contacto mutuo, como debe suceder si la gravitación, en el sentido de Epicuro, fuese esencial e inherente a ella. Y esta es una razón por la cual yo desearía no tener que adscribirme la gravedad innata. El que la gravedad deba ser innata, inherente y esencial a la materia, de modo que un cuerpo puede actuar sobre otro a distancia a través del vacío, sin la mediación de ninguna otra cosa, de modo que mediante él y a través de él su acción y fuerza pueda transportarse de un cuerpo a otro, es para mi

un absurdo tan grande que no creo que haya ninguna persona competente en temas filosóficos que pueda coincidir en ello” (Citado en: Tipler, Paul A. Física, 3ª. Edición, Editorial Reverté, S. A., 1996).

Por su parte Wilhelm Leibniz (1646-1716) critica la teoría de Descartes porque ésta no explica la impenetrabilidad de la materia. Leibniz hace la pregunta: ¿por qué las superficies de los cuerpos sólidos son resistentes a la penetración?. En el sistema de Descartes la pregunta no tiene respuesta. Para contestarla era necesario, junto con la extensión, la fuerza como otra propiedad esencial de la materia. La fuerza debería ser repulsiva para resistir la penetración. Otras características del sistema de Leibniz son: asigna fuerzas a todos los puntos materiales, y no sólo a las partículas de tamaño finito; justifica la fuerza como una propiedad esencial de la materia en el principio de continuidad, que establece que no puede haber cambios bruscos en la naturaleza. Basándose en argumentos teológicos, se opone a la idea de que el mundo está constituido por átomos y vacío. En suma, parece que Leibniz suponía que el mundo consistía en un mar continuo de fuerzas.

Las concepciones del mundo que se desarrollaron después de la de Leibniz, fueron las de Boscovich y Kant. Tanto Boscovich como Kant intentaron sintetizar las ideas de Newton (corpúsculos y espacio vacío) con las ideas de Leibniz (toda materia es fuerza). Kant decía que el mundo está constituido totalmente por espacio vacío y por dos tipos de fuerzas, atractivas y repulsivas. Las fuerzas repulsivas llenan el espacio que ocupan y actúan sólo sobre los puntos de fuerza contiguos, no a distancia. Por el contrario, las fuerzas atractivas actúan a distancia y no llenan el espacio a través del

cual actúan. Para Kant la estabilidad de los cuerpos materiales se debe al equilibrio entre las fuerzas repulsivas y atractivas. Así un cuerpo material es una región continua de fuerzas puntuales rodeada por un espacio vacío.

Más adelante, en 1785 Charles Agustín de Coulomb (1736-1806) da a conocer la ley de interacción entre cargas eléctricas estáticas: la fuerza electrostática es directamente proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de separación. La dirección de la fuerza es la dirección de la recta que une las dos cargas. Ch. A. Coulomb creía que había dos fluidos eléctricos, compuestos por cargas positivas y negativas, y que estos fluidos podían explicar todo lo relacionado con la electricidad. Luego la existencia de la carga era atribuida al exceso de un fluido sobre otro. La ley de Coulomb es semejante a la ley de la gravitación universal de Newton en que varía con el inverso del cuadrado de la distancia. Podemos decir que es una ley de acción a distancia.

Las ideas de Bosovich y Kant fueron retomadas por H. C. Oersted (1777-1851), quien las aplicó a la ciencia física. Oersted resaltó una consecuencia fundamental de la idea de que toda la materia está constituida por fuerzas atractivas y repulsivas: todas las fuerzas eléctricas, magnéticas, químicas, de cohesión y gravitatorias eran manifestaciones de las dos fundamentales de atracción y repulsión y podrían convertirse unas en otras. Esta idea de Oersted constituyó una de las principales guías de la investigación de Faraday.

La primera evidencia concreta de una relación entre electricidad y el magnetismo tuvo lugar en 1820, cuando el físico danés H. C. Oersted realizó una serie de experimentos de consecuencias trascendentales para la evolución de los conceptos físicos.

En su famoso experimento, Oersted situaba una aguja magnética directamente debajo de un largo conductor eléctrico dispuesto horizontalmente. El cable tenía una orientación según la línea norte-sur magnética, de modo que la aguja magnética se alineaba paralelamente al alambre. Al conectar el alambre a los terminales de una batería, la aguja imantada se desviaba en la dirección este-oeste, perpendicularmente al alambre. Lo sorprendente de este resultado es que antes se había demostrado que las cargas eléctricas en reposo no afectan a los imanes, pero ahora estaba claro que las cargas en movimiento (corrientes eléctricas) ejercen un tipo de fuerzas "lateral" sobre un imán situado próximo al alambre conductor.

Los resultados de Oersted fueron el primer ejemplo en el cual se observa una fuerza que no actuaba a lo largo de la línea que conecta las fuentes de fuerza. La fuerza que el alambre portador de la corriente ejerce sobre un polo magnético no está dirigida según la línea que va del alambre al polo: la fuerza sobre el polo es perpendicular a tal línea. La aguja magnética no es atraída o repelida por la corriente: gira lateralmente en virtud de las fuerzas que actúan sobre los polos.

El resultado del experimento de Oersted causó mucha confusión en la comunidad científica, porque la mayoría de los científicos suponían que las fuerzas eran como

las gravitacionales y electrostáticas que actuaban directa e instantáneamente según la línea que unía a las masas o las cargas. Aunque esta suposición no estaba establecida en los Principia de Newton, los científicos posteriores, influenciados con los métodos e ideas newtonianas, parecían haberla aceptado inconscientemente.

Inmediatamente después del anuncio del descubrimiento de Oersted muchos científicos repitieron sus experimentos; entre los más sobresalientes tenemos a los físicos franceses J. B. Biot (1774-1862), F. Savart (1791-1841) y A. M. Ampere (1775-1836). Estos científicos establecieron relaciones cuantitativas entre el campo magnético, la corriente eléctrica y la distancia, así como la fuerza de interacción entre dos alambres que conducen corrientes.

*Tanto Ampère como Coulomb eran de la opinión de que sólo había relación entre fenómenos eléctricos y magnéticos, es decir, fenómenos de la misma naturaleza. Ampère creía firmemente en la línea de investigación newtoniana, así que se enfrentó con el problema siguiente: ¿podría explicarse el experimento de Oersted a partir de una teoría newtoniana?*

Ampère pensó que si los efectos magnéticos se debían a corrientes eléctricas circulares dentro de los imanes, éstas corrientes podían interaccionar con las de otros imanes y con las corrientes (voltaicas), explicando así el descubrimiento de Oersted. Esta era una hipótesis atrevida, porque no se concebía interacción alguna entre las corrientes eléctricas. Entonces realizó experimentos para darse cuenta si dos cables que conducen corriente podían interaccionar, descubriendo que dos

conductores se atraen cuando conducen corrientes en la misma dirección y que la fuerza es repulsiva si las corrientes tienen sentidos opuestos.

Basándose en los hechos experimentales, Ampère desarrolló una teoría newtoniana de la atracción entre corrientes. Supuso que las secciones infinitesimales de la corriente denominadas "elementos de corriente" actúan como las partículas de Newton: la atracción o repulsión se ejerce a lo largo de la línea de unión de dos elementos de corriente: por lo que son fuerzas centrales. Además, la atracción, o repulsión, es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre los elementos y está en proporción directa a la intensidad de la corriente en cada elemento. Sin embargo, Ampère tuvo que tomar en cuenta el ángulo entre los elementos de la corriente, y esto constituye una desviación del modelo newtoniano.

Por otra parte, cuando M. Faraday inició su carrera científica, las concepciones del mundo eran las de Newton y sus seguidores, por un lado, y las de Descartes y Leibniz por el otro. También conocía desde 1816 los trabajos del físico y filósofo croata R. J. Boskovich, quien concebía a los átomos como centros de fuerzas atractivas y repulsivas (Berkson, 1985, pp. 48-49)

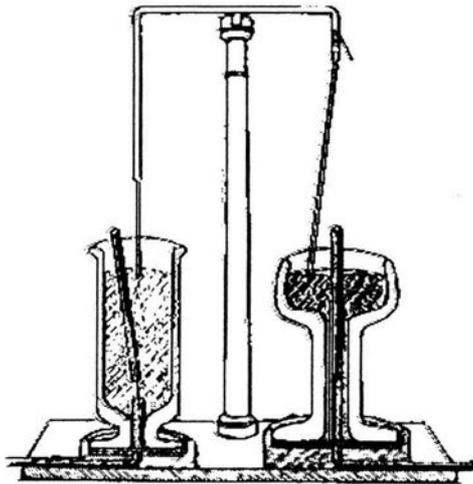
Sin duda ponderó las diferentes concepciones del mundo sobre la base de las distintas teorías científicas y se inclinó por las teorías no newtonianas. Los aspectos de las concepciones antinewtonianas que llamaron su atención fueron:

- La unidad de todas las fuerzas: cosmovisión incluida en las metafísicas de Kant y Bosovich.
- El rechazo de la materia extensa distinta de la fuerza.
- La idea de que el mundo está lleno, y que la acción no se lleva a cabo a distancia, sino únicamente por contacto. (Berkson, 1985, pp. 52-53)

En 1821, Michael Faraday (1791-1867) realizó una revisión histórica de los experimentos y teorías del electromagnetismo para resumir la gran cantidad de trabajos inspirados por el descubrimiento de Oersted del año anterior. No sólo repitió los experimentos en su laboratorio, sino que propuso otros de acuerdo a su propia visión de la naturaleza. Según sus informes, el primer descubrimiento de Faraday sobre el electromagnetismo fue realizado en septiembre de 1821. Al repetir el experimento de Oersted, Faraday comprobó que la fuerza ejercida por la corriente sobre el imán era de naturaleza circular. Pocos años después expresó que el alambre conductor estaba rodeado por una serie infinita de "líneas de fuerza" circulares y concéntricas, de modo que un polo magnético, libre de movimiento, experimenta un impulso en una trayectoria circular alrededor del conductor. El conjunto de estas líneas de fuerza se denomina campo magnético de la corriente, término introducido por Faraday.

Basado en esta idea, Faraday construyó un "rotor electromagnético" (el primer motor), donde una barra magnética pivotada en un extremo podía girar alrededor de un alambre con corriente a lo largo de la línea de fuerza que actuaba sobre el polo

móvil. Utilizaba mercurio para completar el circuito (véase la figura, parte izquierda). Diseñó un dispositivo con el imán fijo; un alambre que transportaba la corriente giraba a su alrededor, demostrando que el imán ejercía una fuerza sobre el alambre (véase la figura, parte derecha).



*Dos versiones del rotor electromagnético de Faraday. En cada una de ellas la copa está llena de mercurio, de modo que una gran corriente eléctrica puede pasar entre el alambre superior y la base. A la izquierda, el polo sur de un imán está fijo y el polo norte puede girar libremente a lo largo de una de las líneas circulares magnéticas que rodean la corriente. A la derecha, la barra que transporta la corriente gira*

*alrededor de la barra magnética sujeta firmemente. (Holton, Gerald., 1981, pp 613)*

A simple vista las líneas de fuerza de Faraday son invisibles e intocables, pero esto no significa que sean imaginarias. De hecho, Faraday hace una distinción entre líneas de fuerza reales, como las magnéticas, y geométricas, como las gravitacionales. La prueba de su existencia consiste en colocar limaduras de hierro sobre un papel junto a un imán. El experimento muestra que las limaduras se alinean de tal modo que se manifiestan las líneas de fuerza.

Fiel a sus convicciones de la unidad de todas las fuerzas, Faraday inició la investigación de producir corrientes eléctricas mediante el magnetismo. Después de varios años de intensa búsqueda, en agosto de 1831, Faraday encontró un efecto positivo: una corriente puede inducir otra corriente sólo mientras está variando. Una corriente estacionaria en un alambre no induce otra corriente en otro alambre. No quedando satisfecho con estas observaciones Faraday trató de determinar lo que eran factores esenciales de este fenómeno llamado inducción electromagnética. Después de muchos ensayos, Faraday estableció su principio general de la inducción electromagnética: "La variación de las líneas de fuerza magnética produce una corriente en un alambre". Este cambio puede producirse: por un imán en movimiento relativo al alambre del conductor, por un cambio en la corriente que circula en un segundo alambre. O bien, utilizando el término de campo de Faraday, se dice que tal corriente se induce en un circuito cuando se establecen a su

alrededor variaciones de un campo magnético; tal variación puede ser causada por el movimiento relativo del alambre y del campo —es el caso cuando se acerca y se retira manualmente un imán de una bobina (Holton, 1981,. —pp, 616-617).

Y es aquí donde se debe señalar que la inducción electromagnética desempeñó un papel trascendental en el origen de la teoría especial de la relatividad de A. Einstein de 1905. Así, en el primer párrafo de su famoso artículo “Zur Electrodynamik bewegter Körper” (sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento) pone de manifiesto lo siguiente:

*“Es sabido que la electrodinámica de Maxwell —tal como se entiende actualmente— conduce a asimetrías que no parecen inherentes a los fenómenos, cuando se le aplica a cuerpos en movimiento. Tómese, por ejemplo, la acción electromagnética recíproca entre un imán y un conductor. El fenómeno que aquí se observa depende únicamente del movimiento relativo entre el conductor y el imán, mientras que la visión habitual establece una aguda distinción entre los dos casos en que uno u otro de estos cuerpos está en movimiento. Ya que si el imán está en movimiento y el conductor en reposo, entonces aparece a los alrededores del imán un campo eléctrico con una cierta energía definida, que produce una corriente en aquellos lugares donde se encuentran partes del conductor. Pero si el imán está estacionario y el conductor en movimiento, no surge ningún campo eléctrico en los alrededores del imán. Sin embargo, en el conductor encontramos una*

*fuerza electromotriz, para la que no existe la energía correspondiente, pero que da lugar –suponiendo que el movimiento relativo es el mismo en los dos casos discutidos- a corrientes eléctricas del mismo camino e intensidad que las producidas por las fuerzas eléctricas en el caso anterior”. (Citado por Sánchez Ron, 1983, pp. 65-66)*

Faraday consideraba a las líneas de fuerza como una sustancia sujeta a esfuerzos y transmisora de ellos; esta sustancia no es la materia en común, y sus diferentes estados deberían permitir explicar todas las fuerzas entre los cuerpos. Esta idea llevó a Faraday a convencerse de que debía existir alguna relación entre la luz, la electricidad y el magnetismo, lo que logró verificar en el descubrimiento del efecto Faraday, que consiste en la modificación del plano de polarización de la luz por un imán.

Por el año de 1844, Faraday propuso considerar que cada átomo está conectado a cualquier otro a través de las líneas de fuerza; por lo que la acción de éstas se extiende sobre todo el espacio. De esta manera, Faraday desaparece la noción de espacio vacío que no necesitaba un éter transmisor de la acción eléctrica o magnética. Con esta idea se evitaba la noción de acción a distancia. (G. Carmona, 1995, pp 77-82).

De las teorías de campo y de acción a distancia ¿Cuál era la más acertada? ¿Se podían distinguir experimentalmente estos dos puntos de vista?. Las teorías de campos predecían que todas las acciones de un cuerpo sobre otro requerían de un

intervalo de tiempo, mientras que las teorías de acción a distancia decían que la acción era instantánea.

La teoría de campos alcanzó el éxito con el descubrimiento por H. Hertz de las ondas electromagnéticas, hacia finales del siglo XIX. La existencia de las ondas electromagnéticas demostró que la propagación de los efectos eléctricos y magnéticos duran cierto tiempo, tal como lo predecía la teoría de campos.

William Thomson (Lord Kelvin), en sus trabajos publicados en 1847 y 1854, llamó la atención a las analogías matemáticas que existen entre teorías sobre el flujo de un fluido, el flujo de calor y la electricidad, por un lado, y la electrostática y el magnetismo, descritos por las líneas de fuerza, por el otro. Podemos decir que: W. Thomson fue el puente entre Faraday y Maxwell.

En esa época James Clerk Maxwell estaba profundamente impresionado tanto con la concepción de Faraday de las líneas de fuerza, como con las analogías matemáticas de Thomson. Dotado de un talento matemático y con un sentido físico intuitivo semejante al de Faraday, se dedicó a tratar de sintetizar en una sola teoría unificada todos los fenómenos conocidos de la electricidad y el magnetismo. En sus primeros dos trabajos, publicados en 1856 y 1861, desarrolló un modelo mecánico de fluido de las líneas de fuerza de Faraday. En 1865, Maxwell publicó la versión final de su teoría:

“Yo he preferido buscar una explicación (de los fenómenos eléctricos y magnéticos) suponiéndolos producidos por acciones que continúan en el medio circundante así como los cuerpos excitados y tratando de explicar la acción entre los cuerpos

distantes sin suponer la existencia de fuerzas capaces de actuar directamente a distancias sensatas”

“La teoría que propongo puede, por tanto, ser llamada teoría del **“Campo electromagnético”** pues trata con el espacio en la vecindad de los cuerpos eléctricos y magnéticos y puede llamarse teoría **Dinámica**, porque supone que en ese espacio existe materia en movimiento, por la cual son producidos los fenómenos electromagnéticos observados...El espacio puede estar lleno con cualquier clase de materia, o podemos suponerlo vacío, como en el caso de los tubos de descarga eléctrica de Geissler y los otros fenómenos llamados fenómenos en el vacío”(Citado por Arons, 1970, pp 570).

En este trabajo y en el “Treatise on Electricity and Magnetism”, publicado en 1873, ya no se presentan las ideas heurísticas de fuentes de fluido, vórtices y los modelos de líneas de fuerza. Solamente quedan las ecuaciones matemáticas y el concepto de “campo” como una condición o estado de un medio etéreo. Aunque no fue aceptada de inmediato la teoría de Maxwell, con el tiempo resultó ser, en la esfera de la electricidad y el magnetismo, una síntesis poderosa semejante a la de Newton respecto de los fenómenos mecánicos. Las ecuaciones matemáticas de Maxwell abarcaron las leyes conocidas y predijeron efectos observables en la electricidad y el magnetismo. Así mismo revelaron la naturaleza de la luz como un fenómeno electromagnético.

La aceptación general de la teoría de Maxwell hacia el final del siglo XIX marcó la transición de una era dominada por la filosofía del concepto de la acción a distancia a la era presente de teorías de campo.

Por otra parte, la visión newtoniana seguía aplicándose al entendimiento de los fenómenos electromagnéticos. Así en Alemania encontramos las electrodinámicas de Franz Ernest Neumann (1798-1894) de 1845 y Wilhelm Weber (1804-1891) de 1846. Estas teorías aspiraban a extender el modelo de acción a distancia a la electricidad y constituyeron un importante avance en la teoría matemática de la electricidad. Estas electrodinámicas mantuvieron su vigencia en el continente europeo hasta que H. R. Hertz (1857-1894) demostró experimentalmente que las ondas electromagnéticas se desplazan con velocidad finita.

Las teorías de Neumann y Weber tienen un punto de partida común, la teoría de Ampère. La electrodinámica de Weber fue la que más se desarrolló y se basaba en dos hipótesis:

- La corriente consiste de dos fluidos de partículas eléctricas moviéndose en sentidos opuestos.
- La fuerza entre dos partículas eléctricas es central, instantánea y de acción a distancia.

Apoyándose en la matemáticas de Gauss y en la teoría de la corriente dada por G. T. Fechner, Weber nos dice: todos los efectos de la electricidad estática, dinámica e inducida podían explicarse por una ley matemática que relaciona las fuerzas debidas a la velocidad y aceleración relativas de las partículas cargadas, que se suponían

constituyentes de la corriente. Es decir, la parte estática de la ley podría expresarse por el inverso del cuadrado; la atracción y la repulsión de las corrientes vendrían explicadas por un término que dependiera de la velocidad relativa de las partículas y los fenómenos inducidos podrían estar representados por una función de la aceleración de las partículas. Matemáticamente esto se expresa en la fórmula:

$$F = \frac{q_1 q_2}{r^2} \left[ 1 - \frac{1}{2c^2} \left( \frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{r}{c^2} \left( \frac{d^2 r}{dt^2} \right) \right]$$

Estas hipótesis son ciertas si se acepta que dos corrientes estacionarias se atraen o repelen de acuerdo con la ley de Ampère y que dos corrientes variables –donde las partículas están aceleradas- provocan efectos inductivos.

De lo anterior, nos damos cuenta que la teoría de Weber había revolucionado la concepción de la acción a distancia, ya que suponía que las fuerzas eléctricas dependían de la velocidad y de la aceleración y no sólo de la distancia.

En 1861, Bernhard Riemann propuso modificar la ley de las fuerzas de Weber. Un aspecto importante de mencionar en la formulación de Riemann, es que postulaba una velocidad finita para la propagación de la acción eléctrica.

También la electrodinámica de Hermann von Helmholtz (1821-1894) se basaba en el concepto de acción a distancia. Lo relevante de su trabajo se caracteriza por tres momentos:

- Introdujo la teoría de Maxwell en Alemania, porque no estaba de acuerdo con la teoría de Weber, ya que ésta violaba el principio de conservación de la energía.
- En 1870 publicó los resultados de su trabajo bajo el título "sobre las ecuaciones de movimiento de la electricidad para cuerpos de conductores en movimiento". El artículo comparaba las distintas teorías electromagnéticas, incluida la de Maxwell.
- Contribuyó al triunfo final de la electrodinámica de Maxwell sugiriendo a su discípulo H. R. Hertz los experimentos que confirmaron en 1887 la existencia de la radiación electromagnética.

El trabajo experimental de Hertz empezó cuando la Academia de Ciencias de Berlín en 1879 había ofrecido un premio para la investigación del siguiente problema: "establecer experimentalmente cualquier relación entre fuerzas electromagnéticas y la polarización dieléctrica de los aislantes; es decir, o una fuerza ejercida por polarizaciones en los aislantes, o la polarización de un aislante como efecto de la inducción electromagnética" (Berkson, 1985, pp.257).

En 1887, H. Hertz utilizó una bobina de inducción o de "chispas", un dispositivo usado para producir altas diferencias de potencial y mantener una descarga eléctrica en gases a baja presión. Se había observado que cuando una bobina de inducción producía chispas intermitentes en el aire, las chispas mismas eran oscilatorias, implicando un movimiento de la carga en un sentido y en otro en las terminales.

Hertz vio esta oscilación como un mecanismo para la generación de ondas electromagnéticas.

Como detector, probó un "receptor" hecho de un pedazo de alambre con terminales esféricas en cada extremo. El alambre estaba doblado formando un círculo y con las terminales bastantes juntas. Una onda electromagnética que pasara debería inducir un campo eléctrico, ejerciendo fuerzas sobre las cargas eléctricas en el alambre. Si los efectos inducidos son suficientemente fuertes, una chispa debería saltar entre las terminales.

Con su dispositivo Hertz no solamente pudo detectar las ondas electromagnéticas en forma cualitativa observando la chispa en su receptor que se encontraba a varios metros de distancia de la bobina de inducción, sino demostró que las ondas eran reflejadas por conductores metálicos, que podían ser refractadas al pasar a través de materiales no conductores e hizo que interfirieran formando ondas estacionarias y midió su longitud de onda (del orden de un metro).

Los experimentos de H. Hertz constituyeron uno de los puntos críticos, social e intelectualmente, de la humanidad. Socialmente estos experimentos han hecho posible el desarrollo de la comunicación de masas por medio de la radio y televisión. Intelectualmente, el resultado de los experimentos demostró que la concepción newtoniana del mundo necesitaba un cambio, porque apoyaban la teoría electromagnética de Maxwell y refutaban las teorías de acción a distancia.

### CAPITULO III. TRABAJOS DE LORENTZ Y POINCARE

Después del desarrollo de la teoría electromagnética de Maxwell, uno de los problemas más importantes que quedaban pendientes era la electrodinámica de los cuerpos en movimiento. Otros problemas eran: la teoría de los dieléctricos, la teoría de la corriente y de la electroquímica, entre otros. La razón de que el problema de los cuerpos en movimiento fuese de capital importancia se debe a que pertenece directamente a la existencia y naturaleza del éter.

Lorentz publicó en 1886 un artículo titulado "De l' influence du mouvement de la terre sur les phenomènes lumineux". En este trabajo Lorentz discute el problema: "en qué grado el éter participa del movimiento de los cuerpos que lo atraviesan", o sea el coeficiente de arrastre de Fresnel. La posición de Lorentz en este artículo es la de negar que exista arrastre en absoluto. Suponía que el éter era el mismo dentro y fuera de la materia, lo que significaba entrar en conflicto con la explicación que Fresnel había dado a su coeficiente de arrastre. Lorentz argumentaba que el cambio que experimentaba la velocidad en un medio activo ópticamente y en movimiento se debía a la influencia que ejercían las moléculas del medio sobre el éter en sus alrededores. En este trabajo se pone de manifiesto la posición atomista de Lorentz.

Se puede decir que el trabajo más importante de Lorentz fue la teoría de los electrones, teoría que por el solo hecho de expresarla se convirtió en el punto de partida de todas las posteriores teorías del electromagnetismo. Para Lorentz, el problema fundamental era la formulación de una teoría electromagnética de los

cuerpos en movimiento que explicara el coeficiente de arrastre de Fresnel y también el fracaso de los experimentos que se proponían medir el “viento del éter”.

Para resolver el problema, Lorentz supuso que todos los cuerpos cargados contienen minúsculas partículas cargadas que obedecen las ecuaciones de Maxwell en un éter en reposo. En 1892 Lorentz publicó un artículo titulado “La teoría electromagnética de Maxwell y su aplicación a los cuerpos en movimiento” (La theorie electromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants). La característica de la teoría de los electrones consiste en que es una combinación de varias teorías: la de Weber que supone que toda la electricidad se debe a pequeñas partículas cargadas que actúan a distancia, con la teoría de Maxwell, que rechaza la acción a distancia y no considera la hipótesis de los “electrones”.

Lorentz demostró que su teoría explicaba un hecho fundamental de la óptica de los cuerpos en movimiento, el coeficiente de arrastre de Fresnel. Sin embargo, era necesario que su nueva teoría explicara el resultado negativo del experimento de Michelson y Morley. Al respecto Lorentz dice:

*“Este experimento me ha traído de cabeza mucho tiempo, y al final sólo se me ha ocurrido un método para reconciliar su resultado con la teoría de Fresnel. Consiste en suponer que la línea que une dos puntos de un cuerpo sólido y que inicialmente siguiera la dirección del movimiento de la Tierra, no conserva la misma longitud cuando el cuerpo gira 90 grados...”*

*Tal y como lo veo, no es inconcebible que la longitud de los brazos del experimento de Michelson sufra cierta variación. ¿Qué es lo que determina el tamaño y forma de un cuerpo sólido?. Evidentemente, la magnitud de las fuerzas moleculares: cualquier cosa que las modifique influirá también sobre la forma y las dimensiones. En la actualidad se puede suponer, sin temor a errar, que las fuerzas eléctricas y magnéticas actúan por medio del éter. Y no parece gratuito suponer que en las fuerzas moleculares ocurre lo mismo... Luego agrega que es imposible contrastar esta hipótesis, ya que desconocemos por completo la naturaleza de las fuerzas moleculares...” (Citado en: Berkson, 1985, pp. 325-326).*

La hipótesis de la contracción de un brazo del experimento de Michelson y Morley también había sido propuesta por el físico irlandés George Francis Fitzgerald en 1889: el movimiento de un cuerpo a través del éter hace que la longitud del cuerpo en la dirección del movimiento disminuya en la proporción  $\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}$ .

Después de haber introducido la hipótesis especial de la contracción de la longitud (contracción de Lorentz) de un cuerpo en movimiento, Lorentz tenía que demostrar que, en su teoría, un sistema en movimiento se comporta como un sistema en reposo. Es decir, Lorentz tenía que demostrar, por ejemplo, que la inducción electromagnética entre dos corrientes en movimiento es muy semejante a la que se

da entre dos corrientes en reposo en el éter. Además estaban los efectos electromagnéticos relacionados con la propagación de las ondas.

Para resolver el problema, Lorentz utilizó el artificio matemático de transformación de coordenadas, método conocido desde la época de Huygens. El hecho de que las leyes de la mecánica newtoniana sean invariantes frente a una transformación galileana se conoce como el principio de la relatividad. Al parecer Lorentz no esperaba que el principio de relatividad tuviera aplicación a los fenómenos ópticos y electromagnéticos, sino que creía que el método de las transformaciones seguiría siendo útil para comparar las leyes de interacción entre sistemas estacionarios y sistemas móviles.

Lorentz descubrió las transformaciones que resolvían el problema y las publicó en 1895 en su obra titulada: "Hacia una teoría de los fenómenos eléctricos y ópticos en los cuerpos en movimiento" (Versuch einer Theorie des Electricischen und Optischen Erscheinung in Bewegten Körpern). Las ecuaciones de transformación obtenidas por Lorentz son:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - \left(\frac{v}{c^2}\right)x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

donde: (x, y, z) es la posición de la partícula en el sistema de referencia S que se considera en reposo (sistema del éter) y (x', y', z') es la posición de la partícula en el sistema de referencia S' en movimiento uniforme con velocidad  $v$  en relación al sistema S, t es el tiempo que mide un reloj en el sistema S y t' es el tiempo que mide un reloj en el sistema S'. Además el sistema S' se mueve con su eje x' paralelo al eje x del sistema S.

La teoría de los electrones se vio fortalecida por dos descubrimientos relevantes. Por una parte en 1896 fue descubierto el efecto Zeeman y por otra J. J. Thomson realizó en 1897 un experimento de mayor trascendencia: midió el cociente entre la carga y la masa de los electrones (los rayos catódicos). El descubrimiento de una prueba directa de la existencia del electrón colocó a la teoría de Lorentz en el centro de interés para posteriores investigaciones en electromagnetismo. Pero el desarrollo de esta teoría planteaba dos problemas: extender la teoría a órdenes superiores de (v/c) y reconciliar la nueva teoría con la mecánica de Newton.

En 1904 Lorentz publicó su versión final de la electrodinámica para los cuerpos en movimiento. El artículo se llamó: "Fenómenos electromagnéticos en un sistema que se mueve con una velocidad arbitraria menor que la de la luz". En su trabajo, Lorentz se enfrenta no sólo al reto que constituía la aparición de nuevos hechos

experimentales válidos hasta segundo orden en  $(v/c)$ , por ejemplo, los resultados de los experimentos de Rayleigh y Brace y los de Trouton y Noble <sup>1</sup> que se añadían a los de Michelson y Morley, sino también a las críticas de Henri Poincaré. Con este fin sentó tres supuestos: a) que los electrones se contraen en un factor  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$  en la dirección del movimiento; b) que las fuerzas entre las partículas cargadas, así como entre partículas no cargadas y electrones, son influidas por las traslaciones, de la misma forma que las fuerzas eléctricas en un sistema electrostático y c) que el electrón no posee masa material, y que la masa de las partículas no cargadas varía de la misma forma que la de las cargadas.

Otro aspecto de la nueva teoría de Lorentz era su expresión para las masas longitudinal y transversal<sup>2</sup> del electrón en movimiento. En realidad fue Max Abraham quien determinó primeramente en 1903 la masa longitudinal y transversal del electrón de acuerdo con su teoría, relacionada más estrechamente con la electrodinámica de Maxwell. A partir de estos supuestos, Lorentz logró deducir la contracción de Lorentz-Fitzgerald y una nueva transformación temporal corregida para magnitudes de segundo orden.

---

<sup>1</sup> El experimento de Rayleigh y Brace tenía como objetivo demostrar si el movimiento de la Tierra hacia ligeramente birrefringente un cuerpo transparente, efecto predicho por la contracción de Lorentz. No se observó la doble refracción. El experimento de Trouton y Noble se proponía comprobar si un condensador cargado manifestaba alguna tendencia a la rotación debido a su movimiento a través del éter. No observaron ninguna tendencia al girar. (Berkson, W., 1985, pp 341-342).

<sup>2</sup> Los conceptos de masa longitudinal y de masa transversal aparecieron en los primeros trabajos experimentales cuando los electrones fueron acelerados por campos electromagnéticos. Estos experimentos pusieron de manifiesto que la aceleración de los electrones no es totalmente paralela a la fuerza, si no que tiene una componente en la dirección de la velocidad. (Resnick, R., 1981, pp 116-117). La interpretación actual consiste en tomar a la masa de los cuerpos como invariante relativista y considerar que es la velocidad la que se transforma al aplicar la transformación de Lorentz.

Al empezar el siglo XX, cuando los experimentos sobre el desplazamiento respecto del éter habían fracasado al no dar resultados positivos, el físico-matemático y filósofo francés J. Henri Poincaré (1854-1912) expresó lo siguiente:

*“..... las leyes de los fenómenos físicos son las mismas, ya sea para un observador fijo, o para un observador transportado en un movimiento uniforme de traslación, de manera que no tenemos y no podemos tener medio alguno de discernir si estamos siendo llevados o no en tal movimiento” (Arons, 1970, pp 930).*

Poincaré se refirió a esta afirmación como el “principio de relatividad”. En este sentido se puede decir que H. Poincaré se anticipó a Einstein. Aunque no abandonó la hipótesis del éter lumínico, creía firmemente en el principio de relatividad, así como en la imposibilidad fundamental de poder detectar el movimiento absoluto a partir de observaciones ópticas. Esto lo afirmó en 1895, cuando desarrolló un programa para completar la teoría electromagnética de los cuerpos en movimiento y abogó porque el principio de relatividad fuera parte de la teoría de los electrones de Lorentz, incluyendo los experimentos hasta segundo orden, para la unificación de la teoría de Lorentz con la mecánica de Newton.

En su obra “El estado presente y futuro de la física matemática”, de 1904, resaltan los temas relativistas como la contracción de Lorentz-Fitzgerald, el aumento de la masa con la velocidad, el papel de  $c$  como velocidad límite de la dinámica. Incluso

llega a considerar el problema de la comparación de los relojes mediante el intercambio de señales luminosas. Sin embargo, su discusión tiene su fundamento en la teoría de Lorentz de los fenómenos electromagnéticos. La mayor parte de sus esfuerzos estaban dirigidos hacia un intento de salvar el punto de vista clásico por la modificación y ajuste de los conceptos antiguos. Parece que Poincaré no pudo abandonar los conceptos clásicos, ni reestructurarlos en una teoría más general.

## CAPITULO IV. LA RELATIVIDAD ESPECIAL.

### *1. INFLUENCIAS FILOSÓFICAS SOBRE EINSTEIN.*

Las influencias que recibió Albert Einstein en su juventud y en los primeros años de trabajo científico, pueden clasificarse en influencias académicas y filosóficas. Existen diferentes testimonios escritos donde Albert Einstein acepta la influencia del pensamiento filosófico de Ernest Mach, así como su distanciamiento de éste.

Un punto de partida lo constituye una carta que Einstein escribió a su amigo Michele Angelo Besso el 6 de enero de 1948. En ella le decía: "En lo referente a Mach, debo distinguir entre su influencia en general y el efecto que produjo en mí". En relación a los fundamentos de la Física, Einstein dice que Mach intentó demostrar, sobre todo en mecánica y en la teoría del calor, cómo los conceptos surgen de la experiencia. Mach defendió con convicción el punto de vista según el cual estos conceptos —en especial los más fundamentales— no extraen su justificación más que de la experiencia, no siendo, en modo alguno, necesarios desde el punto de vista lógico. Su acción ha sido particularmente beneficiosa en tanto ha demostrado claramente que los problemas más importantes de la física no son de naturaleza matemático-deductiva; los más importantes son los que se relacionan con los principios básicos. Einstein comenta que la debilidad del pensamiento machiano está en el hecho de que él creía poco en que la ciencia consistía únicamente en poner orden en el material experimental, es decir, que se subvaloró el elemento constructivo libre en la elaboración de un concepto. De alguna manera, Mach pensaba que las teorías son el

resultado de un descubrimiento y no de una invención” (Sánchez Ron, 1983, pp. 58-59).

En todo lo que se refiere a la influencia de Mach sobre el pensamiento de Einstein, éste reconoce que fue muy grande. Recuerda que fue Besso quien le llamó la atención sobre el tratado de mecánica y teoría del calor en los primeros años de estudio, y que estas obras le causaron una gran impresión. Hasta que punto influyó el pensamiento de Mach, Einstein comenta que no lo veía claro. Recuerda que fue D. Hume quien ejerció una influencia más grande.

De acuerdo con G. Holton, la influencia de la filosofía de Mach en la teoría especial de la relatividad se encuentra en el enfoque instrumentalista de la medición de los conceptos de espacio y tiempo por reglas y relojes. En la primera parte de la teoría especial, Einstein escribía: “tenemos que tener en cuenta que todos nuestros juicios en los que el tiempo entra a formar parte son siempre juicios sobre acontecimientos simultáneos. Si digo, por ejemplo, “ese tren llegó aquí a las siete en punto”, lo que quiero decir es: “la llegada del tren y el que la manecilla pequeña del reloj apunte a las siete son acontecimientos simultáneos”.

El concepto básico que Einstein introduce en la teoría especial es el concepto que engloba a casi todos los “elementos” básicos de Mach, es el concepto de “acontecimientos”. Como dice Einstein: “el tiempo” en que se produce un acontecimiento es el que está dado simultáneamente al acontecimiento por un reloj estacionario colocado en el lugar del acontecimiento. También el concepto de lugar,

o coordenada espacial de un acontecimiento tiene significado solamente en el caso en que entre dentro de nuestra experiencia sensorial por medio de una medición con una regla presente en el mismo instante. (Holton, 1981, pp 172)

Philipp Frank, en "Einstein, Mach and Logical Positivism", nos dice que la definición de simultaneidad en la teoría especial de la relatividad se basa en el requisito de Mach de que todo enunciado de la Física tiene que establecer relaciones entre cantidades observables,..... No hay duda de que..... el requisito de Mach, es decir, el requisito "positivista", tuvo un gran valor heurístico para Einstein. De esta manera, la influencia de Mach es el escepticismo con el que considera los conceptos newtonianos. Sin embargo, de acuerdo con Sánchez Ron, J. M., la ruptura de Einstein con la filosofía machiana ya se encuentra en el intercambio epistolar entre Einstein y Besso de mayo de 1917.

De Besso a Einstein (5 de mayo de 1917):

*"En lo que se refiere al caballito de Mach, no deberíamos insultarlo, puesto que ¿no hizo él posible la infernal jornada a través de las relatividades?"*

De Einstein a Besso (13 de mayo de 1917)

"Yo no prorrumpo en invectivas contra el caballito de Mach, pero bien sabes lo que pienso de él. No puede engendrar nada viviente, sólo puede exterminar parásitos dañinos" (Sánchez Ron, 1983, pp 211).

Otro testimonio semejante al anterior es la carta de Einstein a Cornelius Lanczos del 24 de febrero de 1938, donde le dice que comenzó con un empirismo escéptico más o menos parecido al de Mach, pero el problema de la gravitación lo convirtió en un convencido racionalista; esto es, alguien que toma como única fuente segura de verdad la simplicidad matemática.

En su libro "A Treatise on Human Nature" de David Hume, del año 1888, se encuentran estos pasajes:

*"la idea de espacio o extensión no es sino la idea de puntos visibles o tangibles distribuidos en un cierto orden". Con respecto al tiempo, Hume dice: "el tiempo se descubre siempre mediante alguna sucesión perceptible de objetos que cambian o bien, no tendríamos idea de tiempo sin la existencia cambiante..."*

Basta leer las primeras páginas de la teoría especial de la relatividad de Einstein para reconocer algunas ideas de D. Hume y admitir la posible influencia sobre Einstein. (S. Ron 1983, pp 59-60).

De lo anterior, se puede decir que Albert Einstein sufrió una especie de peregrinaje filosófico ( Holton, 1982, pp 195-203), que va desde una filosofía de la ciencia en la que el empirismo ocupaba una posición central, hasta otra que está fundamentada en un realismo racional.

## INFLUENCIAS ACADÉMICAS SOBRE EINSTEIN.

Cuando Einstein estudió matemáticas y física en el Instituto Politécnico de Zúrick, tuvo como maestros a Hurwitz y Minkowski. Trabajó más tiempo en el laboratorio de física, fascinado por el contacto directo con la experiencia. El resto del tiempo lo dedicó a estudiar en casa los trabajos de Helmholtz, Hertz y otros.

Einstein debió conocer la teoría de Maxwell a través de los libros y artículos de Helmholtz, Hertz, Boltzmann y Augusto Föppl. El enfoque principal de la presentación de los textos alemanes de la segunda mitad del siglo XIX era de tipo epistemológico. Es decir, dedicaban bastante espacio a los temas de filosofía y ciencia, lógica, conceptos y su expresión, hipótesis como bases para las leyes y con poca o casi nula referencia a las actividades experimentales. De ahí que estudiando a Helmholtz, Einstein pudo haber adquirido el gusto por el enfoque epistemológico, así como una impresión de que los experimentos no cuentan en forma crucial.

Por lo que se refiere a la influencia de Hertz, sus obras completas se publicaron por primera vez en 1895 donde se incluyen los trabajos como: las ecuaciones fundamentales de la electrodinámica de Maxwell de 1884 y "sobre las ecuaciones fundamentales de la electrodinámica de los cuerpos en movimiento de 1890". En estos trabajos, Hertz no hace mención explícita a los experimentos del éter.

En cuanto a Lorentz y Poincaré, sin lugar a dudas Einstein no conoció el artículo de Lorentz de 1904 donde aparecían por primera vez en forma exacta sus famosas

ecuaciones de transformación. La revista Kon. Akademie van Wetenschappen, Amsterdam, era difícil de conseguir aun en los institutos de investigación de Alemania y además estaban publicados en holandés e inglés (G. Holton, 1981, pp 255).

Con respecto a otros trabajos de Lorentz, Einstein manifestó que sólo conocía el trabajo de Lorentz de 1895, "La theorie electromagnétique de Maxwell" que se publicó en 1892 y el Versuch einer Theorie Elektrischen... de 1895, pero no su trabajo posterior, ni tampoco las investigaciones de Poincaré. Einstein decía que: "en ese sentido mi trabajo de 1905 fue independiente". (Sánchez Ron, 1983, pp 56-58)

Es posible que Einstein no conociera el trabajo de Poincaré "Sur la dynamique de l'électron", de 1905, donde fue enunciado el principio de la relatividad. Sin embargo, tanto Einstein como sus amigos de aquella época (Solovine y Besso) manifestaron que uno de los libros al que más atención le dedicaron y que más les influyó fue: "La ciencia y la hipótesis," de Poincaré, de 1902. es posible que Einstein extrajese de la lectura de este libro valiosas enseñanzas metodológicas que le sirviesen más adelante a la hora de desarrollar la relatividad especial. (Sánchez Ron, 1983, pp 58).

## 2. LA RELATIVIDAD DE LA SIMULTANEIDAD.

En la sección 1 del artículo de la relatividad, titulada "Definición de simultaneidad", Einstein comienza por definir los conceptos de sistema de referencia inercial y posición con respecto a un sistema de referencia inercial. Sus definiciones se basan en el empleo de reglas rígidas y en los métodos de la geometría euclídea. En seguida explica que como las coordenadas de un punto material en movimiento son funciones del tiempo, se debe explicar lo que se entiende por "tiempo" (En este momento Einstein reemplaza el tiempo absoluto y verdadero de Newton por el tiempo señalado por un reloj).

A continuación, Einstein da a entender que el concepto de simultaneidad no es absoluto: Se debe distinguir entre simultaneidad "local" y a "distancia" mediante una definición operacional. En este sentido da una definición –libre de contradicciones– de "sincronización de relojes", y por consiguiente de "tiempo", para relojes en reposo relativo a un sistema de referencia inercial.

Einstein propuso sincronizar los relojes mediante señales luminosas, a partir de un experimento mental. Por definición, supone que el tiempo durante el que la señal luminosa va del punto A a otro B, es igual al tiempo que pasa al ir la señal de B a A. No lo dice, pero el procedimiento utilizado se basa implícitamente en la homogeneidad e isotropía del espacio para la propagación de la luz. A continuación dice "Consideremos dos relojes en reposo relativo en las posiciones A y B en un sistema de referencia inercial. Se emite en A un rayo de luz cuando un reloj situado allí señala el instante  $t_A$ , este rayo lo recibe un observador situado en B cuando su

reloj señala  $t_B$ , reflejándolo instantáneamente de vuelta a A, llegando en el instante  $t'_A$ . De acuerdo con la definición,

$$t_B - t_A = t'_A - t_B$$

es decir, el reloj en el punto B debe mostrar el tiempo

$$t_B = \frac{1}{2}(t_A + t'_A).$$

(Citado por Sánchez Ron., 1983, pp 68)

Einstein señala que durante la sincronización de relojes se cumplen dos condiciones:

- a) condición de simetría: Si el reloj A funciona de manera sincrónica con el reloj B, éste es sincrónico con el reloj A;
- b) Condición de transitividad: Si los relojes A y B están sincronizados, y el reloj B es sincrónico con el reloj C, entonces el reloj A también caminará de modo sincrónico con el reloj C.

Si dos sucesos distantes son simultáneos en un sistema de referencia inercial, ¿serán simultáneos estos sucesos en un sistema de referencia en movimiento relativo con velocidad constante?. Según la mecánica clásica, el tiempo transcurre de igual forma en todos los sistemas de referencia en movimiento relativo con velocidad constante.

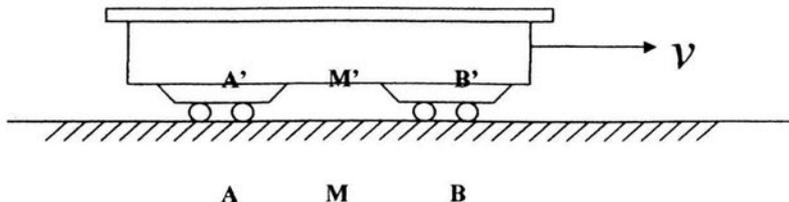
Sigamos la idea del experimento de Einstein. Sea un sistema de referencia fijo en la Tierra y otro sistema, relacionado con un vagón en movimiento rectilíneo uniforme

(ver fig.). Marquemos en la Tierra los puntos A, B, y M, con la condición de que  $AM = BM$ , mientras que en el vagón se marcan los correspondientes A', B' y M' de forma que  $A'M' = B'M'$ . Consideremos el momento cuando los puntos en la Tierra y en el vagón coinciden y en los puntos A y B ocurre cierto suceso, por ejemplo, caen dos rayos. Ahora analicemos estos sucesos desde el punto de vista de los observadores que se encuentran en los dos sistemas de referencia.

En la Tierra: la distancia  $AM = BM$ . La velocidad de la luz es igual en todas las direcciones. Las señales de los dos sucesos llegan al punto medio simultáneamente. Por consiguiente, los acontecimientos en los puntos A y B ocurren al mismo tiempo.

En el vagón: la distancia  $A'M' = B'M'$ . La velocidad de la luz es igual en todas las direcciones. La señal del punto B' llegó antes que la del punto A'. Es decir, el suceso en el punto B' ocurrió antes que en el punto A'. Si el vagón se moviera de derecha a izquierda, obtendríamos el resultado inverso: el suceso en B' ocurriría más tarde que en A'.

Luego la idea de simultaneidad tiene sentido relativo y en diversos sistemas de referencia inerciales el tiempo transcurre de forma distinta.



Comentarios:

- a) En el razonamiento anterior, Einstein utilizó sólo dos principios: los dos sistemas de referencia son equivalentes (principio de la relatividad) en el sentido de que las leyes fundamentales de la física son las mismas en todos los sistemas de referencia y la luz se mueve en todos los sistemas de referencia a la misma velocidad (principio de constancia de la velocidad de la luz).
- b) En la mecánica clásica se suponía que en todos los sistemas de referencia el tiempo transcurre de igual forma. De ahí se obtuvo la suma clásica de velocidades que contradice la constancia de la velocidad de la luz, establecida de manera experimental. Esta suposición no entraba en contradicción con los fenómenos mecánicos en que la velocidad es mucho menor que la de la luz.
- c) La longitud de una barra se define como la diferencia de las coordenadas de sus extremos medidas simultáneamente. Sin embargo, la noción de simultaneidad tiene sentido relativo y los acontecimientos que en un sistema de referencia son simultáneos, no lo son en otro sistema. De esto se sigue que la longitud de una barra en diversos sistemas de referencia será diferente.

Para los profesores que enseñamos física en el nivel Medio Superior, uno de los temas de la Teoría Especial de la Relatividad que más impresiona es la relatividad de la simultaneidad porque choca con el sentido común.

### 3. POSTULADOS DE LA TEORÍA ESPECIAL DE LA RELATIVIDAD.

En la introducción al artículo titulado "Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento" (Zur elektrodynamik bewegter körper), publicado en 1905 en la revista científica alemana Annalen der Physik, Albert Einstein (1879-1995) nos dice:

*"Las leyes de la electrodinámica y de la óptica serán igualmente válidas para todos los sistemas de referencia en los cuales se cumplan las leyes de la mecánica. Elevaremos esta conjetura (el soporte de la misma será llamado aquí Principio de Relatividad) a la categoría de postulado y también introduciremos otro postulado, aparentemente irreconciliable con el primero, a saber: que la luz se propaga siempre en el espacio vacío con una velocidad definida  $c$  independiente del estado de movimiento del cuerpo emisor. Estos dos postulados bastan para conseguir una teoría simple y coherente de la electrodinámica de los cuerpos móviles basada en la teoría de Maxwell de los cuerpos estacionarios". (Einstein, 1952, pp 37-38).*

¿Cuál era la problemática en la que Einstein estaba inmerso y a la que dió respuesta con la relatividad especial? Más de la mitad de los textos de Física Moderna, cuando abordan la teoría de la relatividad especial, primero describen el experimento de Michelson y Morley y enseguida enuncian los postulados de la relatividad. Esto produce en el lector la sensación de que Einstein construyó su teoría para explicar el experimento.

Recordemos que la vida de A. Einstein, al igual que la de M. Faraday, estuvo motivada por una mayor comprensión de las leyes fundamentales de la naturaleza. Así, en 1900, cuando Einstein tenía veintiún años, su motivación principal era encontrar cuáles eran los problemas científicos más fundamentales de la Física. Uno de éstos era el problema de la correcta electrodinámica de los cuerpos en movimiento, tema que ya había sido investigado por H. A. Lorentz; otro era la interacción entre materia y radiación, considerado por Planck. Finalmente estaba la cuestión de la existencia y acción de los átomos cuya realidad supone la mecánica estadística. Estos fueron los problemas que Einstein estudió, más o menos por su cuenta, cuando estaba en la Universidad y más tarde en la oficina de patentes. Estos problemas los abordó con una actitud extremadamente crítica.

Einstein no creó la relatividad forzado por la necesidad imperiosa de encontrar una explicación al resultado nulo que se obtenía de ciertos experimentos ópticos y electromagnéticos —entre ellos el experimento de Michelson y Morley— algo que sí ocurrió en el caso de Lorentz. De hecho, el conocimiento que Einstein tenía del experimento de Michelson y Morley, con anterioridad a la publicación de su artículo de 1905, es un tema sobre el que existe una diversidad de opiniones, favorecidas por las manifestaciones contradictorias del propio Einstein. Así, la introducción del artículo de 1905 sugiere, más no impone, que el interés y/o la información de Einstein por la cuestión experimental era bastante reducida. Sin embargo, Einstein previamente había considerado la cuestión experimental, como lo indica una carta del 10 de septiembre de 1899 a su novia Mileva. En ella le dice que:

*"En Aarau se me ha ocurrido una buena idea para investigar cómo afecta el movimiento relativo de los cuerpos con respecto al éter luminoso, a la velocidad de propagación de la luz en los cuerpos transparentes. También me ha venido a la mente una teoría sobre este asunto que me parece ser altamente probable"* (Sánchez Ron, 1990, pp 45).

Toda la referencia a la cuestión experimental está contenida en el párrafo (Einstein, 1952, pp. 37)

*"Ejemplos de esta especie así como los intentos fracasados de descubrir un movimiento de la Tierra con respecto al "medio de la luz" (el éter), sugieren que los fenómenos electromagnéticos, lo mismo que los mecánicos, no poseen propiedades que corresponden a la idea de reposo absoluto".*

En la conversación de febrero de 1950 que Einstein mantuvo con R. S. Shankland, Einstein manifestó que no había tenido noticias del experimento de Michelson-Morley más que a través de los escritos de Lorentz, y esto sólo después de 1905. Han aparecido evidencias que demuestran que la memoria le jugó una mala pasada a Einstein en su conversación con Shankland. Actualmente se tiende a pensar (ver Sánchez Ron, p. 62) que Einstein sí tenía conocimiento del experimento de Michelson-Morley y que éste tuvo un cierto papel en el hecho de que Einstein rechazara la teoría de Maxwell-Lorentz con su único y privilegiado sistema de referencia anclado en el éter. En este sentido, el mencionado experimento y otros

similares favorecieron el que Einstein adoptara el principio de relatividad. Sin embargo, existen otras líneas de argumentación, independientes del anterior experimento, que bien pudieron llevar también a Einstein al principio de la relatividad.

Una diferencia entre Lorentz y Einstein que se manifiesta en la introducción del artículo de 1905 es: para Einstein, el principio de relatividad no se deduce de la teoría electromagnética, sino que es un postulado. A partir de este principio y del segundo postulado de la constancia de la velocidad de la luz con respecto a todo sistema de referencia, Einstein obtenía toda su teoría. Luego, gran parte de los problemas que la teoría de Lorentz trataba de resolver- y para la que fue en parte construida- dejaban de existir en la teoría de Einstein, ya que eran en esencia sólo distintas expresiones del principio de la relatividad.

Un tema que tuvo una enorme importancia para que Einstein se decidiese a imponer el principio de relatividad, fue la cuestión de las "asimetrías", que se encuentra en los primeros renglones de su artículo de 1905:

*"Es sabido que la electrodinámica de Maxwell –tal como se entiende actualmente, conduce a asimetrías que no parecen inherentes a los fenómenos, cuando se aplica a los cuerpos en movimiento. Tómese, por ejemplo, la acción electromagnética recíproca entre un imán y un conductor. El fenómeno que aquí se observa depende únicamente del movimiento relativo entre el conductor y el imán, mientras que la visión*

*actual establece una aguda distinción entre los dos casos en que uno u otro de estos cuerpos está en movimiento.”*

Luego, una de las motivaciones que llevaron a Einstein a la relatividad especial fue el orden estético. Era su creencia que las teorías físicas no debían contener asimetrías formales (S. Ron, 1983, pp 65-66).

Otra de las cuestiones que le ocupó gran parte de su tiempo durante los años anteriores de 1905, fue la relación existente entre las leyes que regían los fenómenos ópticos y electromagnéticos y el movimiento del observador. Se daba cuenta que si las ecuaciones de Maxwell eran válidas con respecto a un sistema de referencia no lo eran con relación a otro, y esto era inadmisibles para él, es decir, las ecuaciones del electromagnetismo de Maxwell no son invariantes bajo una transformación galileana.

Lo que Einstein intentaba en realidad era modificar la teoría de Maxwell de forma que tuviese una construcción teórica para los fenómenos ópticos y electromagnéticos en la que sólo tuviese significado físico el movimiento relativo. A partir de 1900, la tarea investigadora de Einstein se centró esencialmente en la teoría cuántica de la radiación, encontrando que la radiación posee una estructura discreta o molecular que contradecía a la teoría de Maxwell.

Einstein nos dice en sus notas autobiográficas (Citado por Holton, 1982, pp. 245-246) que después del trabajo de Planck de 1900 ni la mecánica ni la electrodinámica

podrían ser exactamente válidas, excepto en casos límites. Es aquí donde Einstein trata de descubrir un principio formal y universal que lo condujera a resultados consistentes. El ejemplo que conocía era el de la termodinámica: las leyes de la naturaleza son tales que es imposible construir un perpetuum mobile de primera y segunda especie. Después de reflexionar, tal principio surgió de una paradoja que se le había ocurrido a la edad de dieciséis años; cuando era estudiante en la escuela cantonal de Aarau, Suiza, y se preguntaba que ocurriría si persiguiese, con una velocidad  $c$  (la velocidad de la luz), un rayo de luz. ¿Observaría entonces “tal rayo como un campo espacial electromagnético en reposo”? La respuesta de Einstein era clara: No parece que exista tal cosa, ya sea con base en la experiencia o de acuerdo con las ecuaciones de Maxwell. Le parecía intuitivamente claro que, juzgando desde el punto de vista de tal observador, todo debería ocurrir de acuerdo a las mismas leyes que para un observador que estuviese en reposo con relación a la Tierra. Porque en otro caso, ¿cómo podría saber, es decir, ser capaz de determinar el primer observador si está en un estado de rápido movimiento uniforme? En otras palabras, ya a la edad de dieciséis años Einstein poseía los conceptos que al desarrollarse constituirían el principio de relatividad, y como él mismo reconocía cuando escribía, en 1949: “uno ve que en esta paradoja ya está contenido el germen de la teoría de la relatividad especial. Le quedaba por superar un último obstáculo y era que es imposible reconciliar la teoría de Maxwell con el principio de relatividad sin modificar la noción tradicional de tiempo. De nuevo recuperando las palabras de Einstein de sus notas autobiográficas (Citado por Sánchez Ron, 1983, pp. 63-65): “Hoy todo mundo sabe, por supuesto, que todos los intentos por clarificar satisfactoriamente esta paradoja (la del rayo de luz) estaban condenados al fracaso.

Mientras el axioma del carácter absoluto del tiempo, es decir, de la simultaneidad, continuase sin que uno se diese cuenta, anclados en el subconsciente. Evidentemente reconocer este axioma y su carácter arbitrario implica ya realmente solucionar el problema.”

Entonces el propósito del artículo, como se indica en el título y en las primeras líneas de la introducción, es proporcionar una electrodinámica de los cuerpos móviles basada en las leyes formuladas previamente en la electrodinámica de Maxwell para los cuerpos en reposo. Y como dijo Einstein en sus notas autobiográficas: “La teoría especial de la relatividad tiene su origen en las ecuaciones de Maxwell del campo electromagnético. Y a la inversa, éste último puede ser comprendido formalmente de manera satisfactoria solamente por medio de la teoría especial de la relatividad” (Holton, G., 1982, pp, 241-242)

#### *4. ECUACIONES DE TRANSFORMACIÓN DE LORENTZ.*

Einstein usó los dos postulados de la teoría especial para deducir las ecuaciones de transformación que relacionan las mediciones espaciales y temporales en diferentes sistemas de referencias inerciales en movimiento relativo de traslación uniforme. Sus ecuaciones de transformación son idénticas a las ecuaciones de transformación de Lorentz, obtenidas por éste en la teoría de los fenómenos electromagnéticos.

Consideremos que el sistema de referencia  $S'$  se mueve con velocidad constante

$v$  con respecto al sistema  $S$  a los largo de los ejes  $X, X'$  de manera que en el

instante  $t=t'=0$  los orígenes de los ejes de coordenadas se encuentran en un mismo punto.

También suponemos que para el instante  $t=t'=0$  en el origen de las coordenadas se produce un destello de luz, entonces después de cierto tiempo  $t$  en el sistema  $S$  la luz alcanzará los puntos que se hallan en una esfera de radio  $ct$ . De manera análoga, también en el sistema  $S'$  al cabo de un tiempo  $t'$  la luz recorrerá una distancia  $ct'$ . Es decir, que para el sistema  $S$  los puntos de la esfera luminosa satisfarán la ecuación:

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2 \quad 1$$

y en el sistema  $S'$ , la ecuación será

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2 t'^2, \quad 2$$

Considerando que el espacio y el tiempo son homogéneos; supongamos que entre las coordenadas y el tiempo de los diferentes sistemas existe una relación lineal, que es la hipótesis más sencilla. Luego entre las coordenadas  $x$  y  $x'$  es posible la dependencia siguiente,

$$x' = \gamma(x - vt) \quad 3$$

Esta relación se deduce de que el punto  $x'=0$  (el origen de referencia del sistema  $S'$ ) se mueve con velocidad constante  $v$  respecto al sistema  $S$  y en el instante  $t=0$  los

puntos  $x=0$  y  $x'=0$  coinciden. La cantidad  $\gamma$  es por el momento un coeficiente desconocido que para  $v \ll c$  debe hacerse igual a la unidad, tal como en la transformación de Galileo ( $x'=x-vt$ ); luego,  $\gamma$  debe ser función de  $v$  y  $c$ .

Las coordenadas  $y, y'$  y  $z, z'$  no deben variar durante el movimiento de los sistemas a lo largo del eje X, luego

$$y' = y, z' = z \quad 4$$

El tiempo  $t'$  en el sistema S depende linealmente del tiempo  $t$  y de las coordenadas  $x$  en el sistema S; así que suponemos que satisface la ecuación:

$$t' = at + bx \quad 5$$

donde  $a$  y  $b$  son constantes desconocidas, que deben tomar los valores  $a=1, b=0$

cuando la velocidad  $v$  es mucho menor que  $c$  ( $v \ll c$ ).

Sustituyendo las expresiones (3) y (4) y (5) en la (2), se obtiene

$$\gamma^2(x-vt)^2 + y^2 + z^2 = c^2(at+bx)^2 \quad 6$$

Se requiere elegir los valores de los coeficientes  $\gamma, a$  y  $b$  de tal manera que la ecuación (6) satisfaga la ecuación (1). Para ello se deben satisfacer las igualdades siguientes:

$$\gamma^2 - c^2 b^2 = 1; \quad \gamma^2 v + c^2 ab = 0; \quad c^2 a^2 - \gamma^2 v^2 = c^2$$

realizando el álgebra necesaria se encuentra que

$$b = -\gamma \frac{v^2}{c^2}, \quad \gamma = a = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

de este modo se llega a la transformación de las coordenadas del sistema S' con relación al sistema S, que satisface los postulados de Einstein,

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad y' = y, z' = z, \quad t' = \frac{t - \left(\frac{v}{c^2}\right)x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Nótese que cuando la velocidad  $v$  es mucho menor que  $c$ ,

( $v \ll c, \frac{v}{c} \ll 1$  y  $\frac{v^2}{c^2} \rightarrow 0$ ), la transformación de Lorentz se convierte en la transformación de Galileo.

La transformación inversa del sistema S' al sistema S es:

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad y = y', z = z', \quad t = \frac{t' + \left(\frac{v}{c^2}\right)x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

La transformación inversa difiere de la anterior sólo en el signo de la velocidad, ya que el sistema S se mueve con respecto al sistema S' en el sentido de los valores negativos de  $x'$ .

Nótese que el coeficiente  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$  implica que la velocidad  $v$  es menor que

$c$ , ya que de otra manera se haría imaginaria. Los sistemas de referencia siempre están vinculados con los cuerpos materiales, luego la velocidad relativa de los cuerpos no puede ser mayor que la velocidad de la luz. Es decir, la velocidad de la luz es la velocidad límite de movimiento. Esta es una de las conclusiones de la teoría especial de la relatividad. De acuerdo con las ecuaciones de la mecánica de Newton no existe en principio ningún límite superior de la velocidad que puede darse a un objeto. Sin embargo, cuando los electrones son acelerados en un acelerador lineal a través de miles de voltios, la velocidad adquirida no concuerda con la predicción newtoniana. Los experimentos demuestran que la velocidad de los electrones tienden asintóticamente al valor de la velocidad de la luz. (Frech. A. P., 1991, pp. 6-12)

5.- CONTRACCIÓN DE LORENTZ, DILATACIÓN DEL TIEMPO Y SUMA RELATIVISTA DE VELOCIDADES.

La longitud de un cuerpo se define como la distancia entre sus extremos. Sin embargo, si el cuerpo cuya longitud se mide se encuentra en movimiento relativo con respecto a un sistema de referencia S, las posiciones de sus extremos deben medirse simultáneamente. Consideremos una barra en reposo relativo a un sistema S', paralela al eje x'. Si designamos sus extremos por  $x'_1$  y  $x'_2$  entonces su longitud medida por un observador O' es  $L' = x'_2 - x'_1$ . La simultaneidad no es necesaria para O', debido a que él ve la barra en reposo. Sin embargo, para un observador O en el sistema S, quien ve la barra en movimiento, debe medir las coordenadas  $x_1$  y  $x_2$  de los extremos al mismo tiempo t, obteniendo  $L = x_2 - x_1$ . Aplicando la transformación de Lorentz se encuentra que:

$$x'_1 = \frac{x_1 - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad x'_2 = \frac{x_2 - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

ahora, sustrayendo se tiene

$$x_2' - x_1' = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

o bien

$$x_2 - x_1 = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} (x_2' - x_1')$$

es decir

$$L = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} L'$$

Como el coeficiente  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$  es menor que la unidad, se tiene una situación en la cual  $L$  es menor que  $L'$ . Esto es, el observador  $O$ , quien ve el objeto en movimiento mide una longitud menor que el observador  $O'$ , quien ve al objeto en reposo. La longitud es tanto más corta cuando más rápidamente se mueva. Para la velocidad  $v = c$ , la longitud  $L$  sería cero, para velocidades aún mayores, la raíz se haría imaginaria. Un razonamiento semejante demuestra que una barra en reposo en el sistema  $S$  y medida por un observador  $O'$  en el sistema  $S'$  en movimiento uniforme, tiene una longitud menor en  $S'$ . Esta es la famosa contracción de Lorentz.

## DILATACIÓN DEL TIEMPO.

Un intervalo de tiempo se define como el tiempo que transcurre entre dos sucesos, medido por un observador. Por ejemplo la llegada sucesiva de un péndulo al extremo de su oscilación.

Consideremos dos eventos que ocurren en el mismo lugar  $x'$  con respecto a un observador  $O'$  situado en el sistema  $S'$ . El intervalo entre estos eventos es

$\Delta t' = t'_2 - t'_1$ . Para un observador  $O$  con respecto a quien  $O'$  se está moviendo

con velocidad constante  $v$  en la dirección positiva de las  $X$ , el intervalo es

$\Delta t = t_2 - t_1$ . Para encontrar la relación entre los tiempos en los cuales ocurren

los dos sucesos, registrados por ambos observadores, usamos la transformación temporal de Lorentz, obteniendo

$$t_1 = \frac{t'_1 + \left(\frac{v}{c^2}\right)x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad t_2 = \frac{t'_2 + \left(\frac{v}{c^2}\right)x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

(la misma  $x'$  porque el reloj se supone fijo en esa posición), por consiguiente,

$$t_2 - t_1 = \frac{t'_2 - t'_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

o bien

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Resumiendo,  $\Delta t'$  es el intervalo de tiempo medido por un observador O' en reposo con relación al punto en el cual tienen lugar los sucesos, y  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo medido por un observador O relativo al cual el punto está en movimiento cuando los eventos suceden. Es decir, el observador O ve que los sucesos ocurren en dos lugares diferentes del espacio.

Como el factor  $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$  es mayor que uno, la ecuación anterior indica que  $\Delta t$  es

mayor que  $\Delta t'$ . Es decir, los relojes en movimiento "andan" más despacio. A este fenómeno se le llama "dilatación del tiempo". Por ejemplo, si el sistema inercial S' se desplaza con la velocidad de la luz c, para el sistema S respecto al cual viaja, los fenómenos se "congelan", el tiempo no transcurre.

En relatividad es común considerar que el sistema propio es aquel donde el cuerpo está en reposo. Así, a la longitud de una barra en tal sistema se le llama "longitud propia". De la misma manera, el intervalo de tiempo propio es el intervalo de tiempo registrado por un reloj fijo al cuerpo de referencia. En forma equivalente, el intervalo

de "tiempo propio" es el intervalo de tiempo que hay entre dos eventos que ocurren en el mismo lugar.

En resumen, si un sistema de referencia inercial  $S'$  se mueve a velocidad constante  $v$  respecto a otro sistema inercial  $S$ , un observador en cualquiera de los dos sistemas encontraría, a partir de sus propias medidas, que los intervalos de longitud de los objetos que se mueven con el sistema del otro se contraen en un factor

$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$  y que los intervalos de tiempo entre los sucesos se dilatan (los relojes

móviles parecen retrasarse respecto al observador fijo) en el factor  $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

#### *SUMA RELATIVISTA DE VELOCIDADES.*

En la mecánica clásica, si un tren se mueve a una velocidad  $\vec{v}$  con respecto a tierra y un pasajero en el tren se mueve a una velocidad  $\vec{u}'$  con respecto al tren, la velocidad del pasajero con relación a tierra es la suma vectorial de las dos velocidades, esto es,

$$\vec{u} = \vec{u}' + \vec{v}$$

conocida como la ley clásica de la adición de velocidades. ¿Cómo se suman las velocidades en la teoría especial de la relatividad?

Consideremos el caso especial donde todas las velocidades están en la dirección de los ejes  $X, X'$  de los dos sistemas inerciales  $S$  y  $S'$ . Sea  $S$  el sistema de la tierra y  $S'$  el sistema del tren, cuya velocidad relativa es  $V$ . La velocidad del pasajero en el sistema  $S'$  es  $u'$  y su posición en el tren, mientras transcurre el tiempo, puede describirse como  $x' = u't'$ .

Deduzcamos la velocidad del pasajero, observada desde la tierra, utilizando las ecuaciones de transformación de Lorentz,

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = u't' \qquad t' = \frac{t - \left(\frac{v}{c^2}\right)x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Combinándolas se tiene  $x - vt = u' \left[ t - \left(\frac{v}{c^2}\right)x \right]$ , que se puede escribir como

$$x = \frac{u'+v}{1 + \frac{u'v}{c^2}} t.$$

Si llamamos  $u$  a la velocidad del pasajero con respecto a tierra, al transcurrir el

tiempo, su posición en tierra está dada por  $x = ut$ . Luego  $ut = \frac{u'+v}{1 + \frac{u'v}{c^2}} t,$

de donde

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}}$$

La transformación inversa es

$$u' = \frac{u - v}{1 - \frac{uv}{c^2}}$$

Obsérvese que si las velocidades  $u'$  y  $v$  son muy pequeñas comparadas con la velocidad de la luz  $c$ , la ecuación  $u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}}$  se reduce a la suma clásica de

velocidades  $u = u' + v$ , ya que  $\frac{u'v}{c^2}$  tiende a cero. Pero supongamos que

$u' = c$ , como sería el caso de un pulso de luz en el vacío. Luego se obtiene que

$$u = \frac{c + v}{1 + \frac{cv}{c^2}} = \frac{c + v}{c(c + v)} c^2 = c, \text{ que es la suposición de que todos los}$$

observadores miden la misma velocidad  $c$  para la luz. También de la suma relativista de velocidades se deduce que la suma de dos velocidades, cada una menor que  $c$ , no puede exceder la velocidad de la luz.

La suma relativista de velocidades explica el coeficiente de arrastre observado por Fresnel. En este caso, el paso de la luz a través de un medio como el vidrio o el agua viene caracterizado por el índice de refracción  $n$ , y la velocidad de la luz relativa al

medio es  $\frac{c}{n}$ . Supongamos que el agua se mueve a una velocidad  $v$  paralelamente a la dirección de la luz. La velocidad de la luz con relación a un

observador en reposo en el laboratorio es  $u = \frac{\frac{c}{n} + v}{1 + \frac{v}{nc}}$ .

Ahora bien, para velocidades mucho menores que la velocidad de la luz, se puede desarrollar esta expresión en potencias de  $\frac{v}{c}$  y despreciar todas las potencias

superiores a la primera (en el experimento de Fizeau,  $\frac{v}{c} = 2.3 \times 10^{-8}$ ).

$$\begin{aligned} u &= \frac{c}{n} \left( 1 + \frac{vn}{c} \right) \left( 1 + \frac{v}{nc} \right)^{-1} \\ &= \frac{c}{n} \left( 1 + \frac{vn}{c} \right) \left( 1 - \frac{v}{nc} + \dots \right) \\ &\approx \frac{c}{n} \left( 1 + \frac{vn}{c} - \frac{v}{nc} \right) \end{aligned}$$

por tanto,  $u \approx \frac{c}{n} + \left( 1 - \frac{1}{n^2} \right) v$ , que es la ecuación dada por Fresnel. Es decir, la

suma relativista de velocidades conduce, sin necesidad de ninguna otra hipótesis, al

resultado que Fresnel y otros científicos del éter tuvieron que explicar en términos de un arrastre parcial de la luz por el medio. Así, para Einstein constituyó un resultado importante que desempeñó un papel destacado como guía hacia la teoría especial de la relatividad.

Hasta este momento se ha considerado únicamente la transformación de velocidades paralelas a la dirección del movimiento relativo de los dos sistemas de referencia (la dirección  $X, X'$ ).

Para expresar esto, es necesario colocar subíndices  $X$  para las velocidades  $u$  y  $u'$  en la ecuación anterior:

$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{u'_x v}{c^2}}$$

Para velocidades perpendiculares a la dirección del movimiento relativo, el resultado es diferente. El resultado para la componente  $u_y$  es

$$u_y = \frac{u'_y \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + \frac{u'_x v}{c^2}}$$

y la transformación inversa es

$$u_{y'} = \frac{u_y \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 - \frac{u_x v}{c^2}}$$

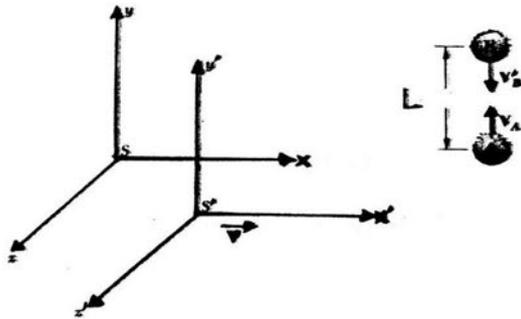
## 6. MOMENTUM O ÍMPETU RELATIVISTA.

En la mecánica clásica se define el momentum o ímpetu de una partícula como el producto de su masa por su velocidad,  $\vec{p} = m\vec{v}$ , siendo  $\vec{v}$  la velocidad. En un sistema aislado de partículas, sin ninguna fuerza neta que actúe sobre el mismo, el ímpetu total del sistema permanece constante. Sin embargo, es de esperarse que la expresión clásica para el momentum,  $\vec{p} = m\vec{v}$ , no sea válida en la mecánica relativista ya que la velocidad se transforma de manera distinta al caso clásico. Se analiza la situación mediante un experimento mental.

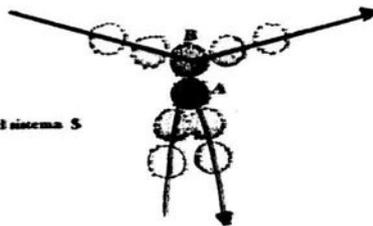
Consideremos una colisión elástica entre dos bolas de billar A y B, que es vista por dos observadores situados en los sistemas de referencia S y S' con movimiento relativo uniforme. La masa de las bolas es la misma cuando la miden en un sistema de referencia en reposo. Por comodidad, consideramos que el sistema de referencia S' se mueve según la dirección del eje X positivo con la velocidad  $V$  en relación al sistema S.

Inicialmente, la bola A se encuentra en reposo en el sistema S y la bola B también se encuentra en reposo en el sistema S'. Al mismo tiempo, la bola A se pone en movimiento en la dirección positiva del eje Y con la rapidez  $v_A$ , mientras que la bola

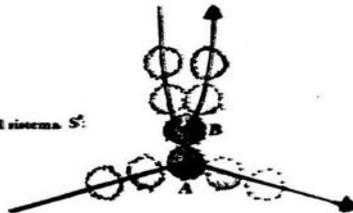
B se pone en movimiento en la dirección negativa del eje  $Y'$  con la rapidez  $v_B'$ , de tal forma que las rapidezces son iguales ( $v_A = v_B'$ ). Ver la figura



choque visto desde el sistema  $S$



choque visto desde el sistema  $S'$



Choque elástico según se observa desde dos sistemas de referencia diferentes.

Cuando las bolas colisionan, la bola A rebota en la dirección negativa del eje Y con la rapidez  $v_A$ , mientras que la bola B rebota en la dirección positiva del eje Y' con la rapidez  $v_B'$ . Si las bolas están separadas por una distancia L cuando se lanzan, un observador en el sistema S encuentra que el choque ocurre en la posición  $y = \frac{1}{2}L$ ; también el observador en el sistema S', encuentra que la colisión ocurre en  $y' = \frac{1}{2}L$ .

El tiempo  $t_0$  de viaje redondo para la bola A medido por un observador en el sistema S es  $t_0 = \frac{L}{v_A}$ , y el tiempo de viaje redondo para la bola B, medido en su

sistema de referencia S' es  $t_0 = \frac{L}{v_B}$ .

Si queremos que el momentum lineal se conserve en el sistema de referencia S, entonces se debe cumplir que  $m_A v_A = m_B v_B$ , donde  $m_A$  y  $m_B$  son las masas de los cuerpos A y B, y  $v_A$  y  $v_B$  son sus velocidades medidas por un observador en el sistema S. En el sistema S, un observador mide la rapidez de la bola B como

$v_B = \frac{L}{t}$ , donde  $t$  es el tiempo de viaje redondo. Sin embargo en el sistema  $S'$ , el

tiempo de viaje redondo de B es  $t_0$ ; la relación entre  $t$  y  $t_0$  es

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Aunque los observadores situados en los sistemas de  $S$  y  $S'$  observan la misma colisión (evento), están en desacuerdo con la magnitud del tiempo de viaje redondo,

$t$  y  $t_0$ . Reemplazando  $t$  en la ecuación  $v_B = \frac{L}{t}$  se obtiene  $v_B = \frac{L\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{t_0}$ .

Pero  $v_A = \frac{L}{t_0}$ , así que:  $v_B = v_A \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ . Introduciendo este valor en la ley de

conservación del ímpetu lineal  $m_A v_A = m_B v_B$ , se obtiene

$$m_A v_A = m_B \left( v_A \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right).$$

Luego, si el ímpetu lineal se conserva, entonces debe cumplirse la relación

$m_A = m_B \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ . Al principio se supuso que las masas de las bolas eran

idénticas cuando estaban en reposo con respecto a un observador, pero se

encuentra ahora que existe una diferencia entre  $m_A$  y  $m_B$ . Esto significa que la medida de la masa de los cuerpos, tal como la longitud y el intervalo de tiempo, dependen de la velocidad relativa entre los observadores.

Ahora consideremos la situación donde las velocidades  $v_A$  y  $v_B$  son pequeñas en comparación con la velocidad  $v$  del sistema  $S'$ . En este caso, un observador en el sistema  $S$  verá que la bola se acerca a la bola  $A$  con una velocidad  $v$ , produciendo una colisión oblicua (ya que se supuso que  $v_B \ll v$ ). Si en el sistema  $S$  se

considera que  $m_A = m_0$  y  $m_B = m$ , entonces se obtiene que  $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ ,

relación que nos permite obtener la masa de un cuerpo en movimiento en términos de su masa en reposo  $m_0$ . Luego, la masa de un cuerpo en movimiento con velocidad  $v$  en relación a un observador situado en un sistema de referencia inercial  $S$ , es mayor que cuando se encuentra en reposo con respecto al mismo observador

por el factor  $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ . Por simetría, un observador en el sistema  $S'$  obtiene el

mismo resultado, donde  $m_A = m$  y  $m_B = m_0$ . Si se define el momentum lineal como

$p = m \vec{v} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ , entonces el momentum se conserva en todas las

colisiones y cuando  $\frac{v}{c}$  tiende a cero, se obtiene el ímpetu clásico. Es decir, la ley de la conservación del ímpetu es válida tanto en la mecánica newtoniana como en la teoría especial de la relatividad, cumpliendo así con el principio de relatividad de Einstein.

Otra interpretación consiste en tomar la masa de los cuerpos como invariante relativista y considerar que es la velocidad la que se transforma al aplicar la transformación de Lorentz. Este es el punto de vista que se toma actualmente. (Léase Shahan Hacyan, 1995, pp. 67-69)

### *7. ENERGÍA RELATIVISTA.*

En la mecánica clásica, el trabajo realizado por una fuerza no equilibrada que actúa sobre una partícula es igual a la variación de la energía cinética de la misma. En la mecánica relativista, se iguala la fuerza no equilibrada a la variación temporal del momento relativista. El trabajo realizado por una fuerza de este tipo puede calcularse e igualarse a la variación de la energía cinética. Así, la energía cinética se define como el trabajo realizado por una fuerza no equilibrada para acelerar una partícula desde el reposo hasta cierta velocidad. Luego, considerando el movimiento en una dimensión se obtiene:

$$K = \int_{u=0}^u F dx = \int u dp = \int u d \left( \frac{m_0 u}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \right) = \int m_0 \left( 1 - \frac{u^2}{c^2} \right)^{-\frac{3}{2}} u du = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} - 1 \right)$$

o bien,

$$K = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} - m_0 c^2$$

donde:  $u = \frac{dx}{dt}$  y  $d \left( \frac{m_0 u}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \right) = m_0 \left( 1 - \frac{u^2}{c^2} \right)^{-\frac{3}{2}} du$ .

Esta expresión de la energía cinética la obtuvo Einstein en la sección diez de su trabajo de 1905 reproducido en "The Principle of Relativity" cuando calculó la energía cinética de un electrón en un campo electrostático externo. La ecuación implica la famosa equivalencia entre la masa y energía,  $E = mc^2$ , pero de esto Einstein no se daría cuenta hasta poco después, cuando escribió su famoso artículo "¿Depende la inercia de un cuerpo de su contenido energético?" (Einstein, 1952, pp. 69-70).

Volviendo a la expresión de la energía cinética, nos damos cuenta que consta de dos términos. El primero depende de la velocidad de la partícula. El segundo,  $m_0 c^2$  se

le conoce como "energía en reposo" de la partícula  $E_0$ , y es igual al producto de la masa en reposo por  $c^2$ :

$$E_0 = m_0 c^2$$

La energía relativista total  $E$  se define entonces como la suma de la energía cinética más la energía en reposo:

$$E = K + E_0 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

La expresión relativista para la energía cinética  $K$  debe reducirse al resultado clásico,  $\frac{1}{2} m_0 u^2$ , cuando  $\frac{u}{c} \ll 1$ .

Esto se comprueba usando el desarrollo binomial en  $\left(\frac{u}{c}\right)$ ; queda

$$K = m_0 c^2 \left[ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{u}{c}\right)^2 + \frac{3}{8} \left(\frac{u}{c}\right)^4 + \dots - 1 \right], \text{ luego } K = \frac{1}{2} m_0 u^2, \text{ donde se}$$

toman únicamente los dos primeros términos del desarrollo como significativos

cuando  $\frac{u}{c} \ll 1$ , confirmando así el límite newtoniano del resultado relativista.

Además, notemos que cuando la velocidad  $u$  tiende a la velocidad de la luz  $c$ , la energía cinética  $K$  tiende a infinito. Esto significa que se necesitaría ejercer una

cantidad infinita de trabajo sobre la partícula para acelerarla hasta alcanzar la velocidad de la luz. Así que la velocidad de la luz tiene la función de velocidad límite.

## CAPITULO V. ACEPTACIÓN DE LA TEORÍA ESPECIAL DE LA RELATIVIDAD.

La recepción que los físicos de Francia, Estados Unidos y Gran Bretaña dieron a la teoría de relatividad de Einstein fue en general negativa. Comencemos por Francia, donde la respuesta fue muy pequeña en realidad. Solamente Paul Langevin apreció en 1906 el valor de la relatividad. Langevin impartió cursos de relatividad en el College de France, donde se encontraban los científicos Jean Becquerel, Emil Borel, J. Hadamard y Elie Cartan, quienes años más tarde contribuirían al desarrollo o difusión de la relatividad. Por lo que se refiere al resto de los científicos franceses, no hacen mención alguna de Einstein hasta el año 1919, cuando se hizo popular la relatividad general. Las posibles explicaciones a este hecho se deben a que:

- a) De 1905 a 1912, la figura más destacada en la electrodinámica en Francia fue H. Poincaré, quien nunca se refirió a Einstein en este contexto. Se puede suponer que el silencio de Poincaré hacia la relatividad de Einstein se deba a que la relatividad no reunía las características que Poincaré sostenía para una buena teoría: simplicidad, flexibilidad y naturalidad.
- b) Otro de los posibles motivos es de orden político: los conflictos entre Alemania y Francia que desembocarían en 1914 en la Primera Guerra Mundial, con la ruptura total de relaciones entre ambos países.

Por lo que se refiere a Estados Unidos la situación no fue muy diferente a la de Francia. Se puede decir que hasta 1908 no había respuesta a la teoría de la

relatividad en los Estados Unidos. Los físicos de esos años se preocupaban por los experimentos sobre el arrastre del éter. Así encontramos que E. B. Brace, profesor de física en la Universidad de Nebraska repitió uno de los experimentos del arrastre del éter, no encontrando ningún efecto detectable del movimiento de la Tierra a través del éter. También en 1905, E. Morley y D. C. Miller repitieron el experimento de Michelson y Morley con diferentes materiales, obteniendo un resultado nulo.

En 1907, el físico D. F. Comstock (quien recibió su Ph. D en Basel, Suiza, en 1906) publicó un trabajo llamado *On the Relation of Mass and Energy*. En su obra dedujo en forma independiente la relación  $E = \frac{3}{4} mc^2$ , que es idéntica a la fórmula deducida por Abraham y Hasenöhr (físicos alemanes). A esta relación le llamó la parte electromagnética de la masa. Posteriormente Comstock reconoció que no conocía el trabajo de Einstein y que no lo leyó hasta el año de 1910. Este ejemplo muestra la situación del conocimiento de la relatividad entre los físicos americanos.

En 1908, Gilbert N. Lewis, físico-químico en el MIT, publicó un trabajo que conducía directamente a la teoría especial. Su trabajo había sido motivado por los recientes experimentos de Kaufmann y H. H. Bucherer sobre la medida de la razón de la carga a la masa de los electrones muy veloces. Lewis llamó a su trabajo "A revision of the Fundamental Laws of Matter and Energy". En su obra, Lewis cita la relatividad de Einstein y la publicación de D. F. Comstock. Señala en su trabajo que era necesario construir una mecánica en donde la energía, la masa y la cantidad de movimiento se conservaran en cada instante de cada proceso químico. Sin embargo, para Lewis, el

principio de la relatividad y la constancia de la velocidad de la luz eran generalizaciones empíricas.

El trabajo de Lewis recibió fuerte oposición en su país. Fue criticado fuertemente por la carencia de significado físico. Las conclusiones obtenidas, que eran semejantes a las de Einstein, fueron ridiculizadas por ser contrarias al sentido común. Así para L. T. More, profesor de física en la Universidad de Cincinnati, el error más grande de Lewis fue suponer que la luz posee no solamente momentum y energía, sino masa. Además, More ridiculizaba la implicación de que la masa y la energía eran equivalentes.

En diciembre de 1908, en la reunión de la American Physical Society, Lewis y R. C. Tolman (físico químico en el MIT) dieron a conocer un artículo relacionado con la teoría especial de la relatividad. Este trabajo se considera relevante porque:

- a) Fue la primera exposición de la relatividad en los Estados Unidos.
- b) Fue el primer artículo que no hace referencia a la electrodinámica para llegar a la relatividad.
- c) Contiene un experimento pensado para explicar la relación entre masa en reposo y masa en movimiento.

De ahí que se tome como referencia a Lewis y Tolman como los físicos que introdujeron la relatividad en los Estados Unidos. Sin embargo, Lewis y Tolman consideraban como generalizaciones empíricas la constancia de la velocidad de la luz y la imposibilidad de medir absolutamente el movimiento uniforme. Este punto de

vista era consistente con el pragmatismo experimental que prevalecía en la comunidad científica americana.

Esta forma de pensar de los físicos americanos sobre la relatividad especial se mantiene hasta después de la Segunda Guerra Mundial. El punto crítico en el análisis de la relatividad en los libros de texto americanos fue la publicación de la obra *Classical Electricity and Magnetism*, de W. Panofsky y Melba Phillips. Los autores examinan la evidencia experimental perteneciente al dominio de la relatividad especial y teorías del éter y de la emisión. Concluyeron que sólo la teoría de la relatividad explica satisfactoriamente los resultados experimentales de primero y segundo orden del arrastre del éter, así como las experimentos físicos de altas energías.

La respuesta británica a la relatividad especial fue una reacción de defensa ante lo que consideraban un ataque a un concepto alrededor del cual giraba la física británica: el éter. Uno de los principales defensores del éter fue Oliver Lodge. Era tal su creencia en el éter que se volvió místico; pensaba que el éter era el ropaje de Dios.

La actitud de J. J. Thompson hacia el éter fue semejante a la de Lodge. Así lo expresó en su "Presidential Address" a la British Association for the Advance of Science reunida en Winnipeg en 1909; se refería a éste diciendo:

*"el éter no es una creación fantástica del filósofo especulativo, es tan esencial para nosotros como el aire que respiramos.... (y el) banco en el que podemos depositar energía y extraerla según nos convenga".(Sánchez Ron, 1983, pp 78-79).*

Durante la segunda década del siglo XX, Norman R. Campbell cuestionó la validez del concepto del éter y apoyó la teoría de relatividad. En 1910 Campbell publicó su trabajo llamado *The Aether* y en 1911, *The Common Sense of Relativity and the Conservation of Mass*. Decía que el concepto del éter era insatisfactorio porque continuamente se tenían que redefinir sus propiedades para poder explicar la carencia de su detección. Todavía en el año de 1923, Campbell escribía que el físico británico medio era ignorante del trabajo de Einstein y con poco interés en él.

Se puede decir que los físicos británicos utilizaron varios modos para evitar la teoría de la relatividad, entre ellos tenemos:

- a) Reinterpretaron la relatividad para conformar una teoría del éter.
- b) Consideraron la relatividad como inadecuada porque carecía de bases experimentales.
- c) Ignoraron la teoría porque era incompresible o porque no tenía importancia.

Estas fueron la técnicas que usaron Lodge, Cunningham, J. J. Thomson, Larmor y otros; excepto N. R. Campbell.

Para explicar la postura británica, se debe tomar en cuenta la dirección que E. Rutherford y su escuela experimental dieron a la física británica, así como la propensión a entender los fenómenos físicos en términos de modelos mecánicos, postura fuertemente criticada por Pierre Duhem (físico y filósofo francés). Luego, junto al éter, sería la física atómica la que ocuparía la atención de los físicos británicos en las primeras décadas del siglo XX.

La aceptación que la teoría especial de la relatividad encontró en Alemania fue totalmente opuesta a la que se dió en Gran Bretaña, Francia y Estados Unidos. Así, de 1905 a 1911, la relatividad fue discutida, analizada y desarrollada por los físicos alemanes. Mención especial merece el esfuerzo y colaboración de Max Planck, Max T. F. von Laue y Jakob Laub, sin los cuales, el establecimiento definitivo de la relatividad se hubiese demorado algunos años.

En ese tiempo, Planck ya era catedrático en Berlín y una figura prominente en la física alemana. Fue posiblemente el primero en reconocer el alcance y profundo significado de la relatividad especial, ya que era uno de los editores del *Annalen der Physik*, donde se publicó el trabajo de Einstein. Planck se convirtió en un ardiente defensor de las ideas de Einstein, no solo por razones científicas sino también de orden filosófico. Así, cuando Kaufmann sometió en 1906 la relatividad especial a la confrontación experimental sobre los cambios que sufría la masa de un electrón acelerado, llegando a conclusiones que no favorecían a la teoría de Einstein, ni la de Lorentz, pero sí a la formulación de M. Abraham, Planck salió inmediatamente en defensa de la relatividad. En septiembre de 1906, Planck presentaba una comunicación en la reunión de la Sociedad de Científicos de la naturaleza y médicos

alemanes en Stuttgart, donde demostraba que la relatividad especial también proporcionaba resultados consistentes con las mediciones de Kaufmann si se corregía un error cometido por Einstein en su artículo de 1905 al generalizar la segunda ley de movimiento de Newton. Finalmente A. H. Bucherer en 1909 demostró que la experiencia favorecía a la teoría de Einstein.

Max von Laue, que fue asistente de Planck, escribió el primer libro dedicado a la relatividad, "Das Relativitätsprinzip", en 1911, contribuyendo de esta forma a la difusión y comprensión de la teoría de Einstein.

Wilhelm Wien, editor de los *Annalen der Physik*, encargó a J. Laub que preparase un seminario sobre la relatividad. A partir de entonces, Laub se concentró en investigar problemas relativistas, entrando además en contacto con Einstein con quien escribiría dos artículos en 1908. El punto culminante de la dedicación de Laub a la relatividad fue el artículo publicado en 1910 en el que discute las bases experimentales de la relatividad. A pesar de no ser un físico de la talla de Planck o incluso de von Laue, Laub tenía las relaciones suficientes como para servir de vehículo de transmisión de información de Einstein a la comunidad científica centroeuropea.

## CONCLUSIONES

Se puede decir que la teoría especial de la relatividad de Einstein fue aceptada por la comunidad científica, porque:

Modifica exitosamente la teoría de Newton para hacerla consistente con la electrodinámica de Maxwell, haciendo ver que es el límite para velocidades menores que la de la luz. Explica hechos como el experimento de Michelson-Morley, la aberración de la luz estelar, el experimento de Fizeau del arrastre parcial del éter y otros, que podían interpretarse muy vagamente y a veces de manera contradictoria con las antiguas teorías. Predice efectos como el retraso de los relojes cuando viajan con velocidades cercanas a la de la luz, que pueden comprobarse experimentalmente (desintegración radiactiva de los piones) y la imposibilidad de que un objeto, independientemente de su energía, pueda viajar más rápido que la velocidad de la luz. También predice que los objetos aumentan de masa cuando viajan a velocidades cercanas a la de la luz.

Por último, se puede decir que la teoría de la relatividad especial es sencilla, coherente y elegante, sólo consta de dos postulados que se pueden resumir en una frase: Las leyes generales de la Física, en particular las ecuaciones de Maxwell deben tener la misma forma en todos los sistemas de referencia que se mueven uniformemente unos respecto de otros y respecto a las estrellas lejanas.

Por otra parte, espero que las autoridades educativas del Colegio de Bachilleres valoren este trabajo y contribuyan a su difusión entre los profesores que imparten la asignatura de Física Moderna I en los veinte planteles que tiene esta Institución, con la finalidad de apoyarlos en la comprensión de los conceptos básicos de la teoría especial de la relatividad, a través de conocer su origen y evolución y entender los problemas a los que se tuvieron que enfrentar los científicos.

Además, con ello se pretende que el profesor transmita estos conocimientos de una manera menos dogmática, tomando en cuenta el contexto histórico en el que se desarrollaron, así como los intensos debates que conducen a la aceptación final de una teoría física.

## BIBLIOGRAFÍA

### CAPITULO I

- Del Río, F. , Flores, J. , *Conceptos de la Física I. Modelos Clásicos*. Consejo Nacional de Fomento Educativo- Alambra Mexicana, México, (1986, pp. 35-38).
- Einstein, A. *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*. Alianza editorial (AU 1048), Madrid, pp. 9-20, (1984).
- French, A. P., *Newtonian Mechanics.*, W. W. Norton & Company, New York, (1971) cap 6.
- González y Hernández, P. Alejandro. *Lecturas de apoyo para Física Moderna I*. Colegio de Bachilleres. México (1994).
- Haber-Schaim, Uri. , et. Al. , *PSSC. Física, tercera edición, sexta reimpresión*, México, pp. 256-261, (1998).
- Landau, L. , Rumer, Y. , *¿Qué es la teoría de la relatividad?*
- Lozano, J. M. , *¿Cómo acercarse a la Física?*, Limusa, México, (1996).
- Smith, James H. *Introducción a la relatividad especial*. Reverté, España, (1978), cap. 1.
- Torres, L. M. *Física Moderna 4*, Limusa, México, pp. 10-17, (1981).
- Yavorski, B. M. ,Pinski, A. A. ,*Fundamentos de Física I*, Mir, Moscú, (1983), cap. 12.

## CAPITULO II

- Arons, Arnold B. *Evolución de los conceptos de la Física*. , Trillas, México, (1970), cap. 23.
- Banesh, Hoffmann. *La relatividad y sus orígenes*. Editorial Labor, S. A. , primera edición, España, (1985).
- Berkson, William. , *Las teorías de los campos de fuerza. Desde Faraday hasta Einstein*. Alianza Editorial, Madrid, (1985), cap. 5.
- Born, Max, *Einstein's Theory of Relativity*. Dover, New York, (1965), cap. V.
- Gerardo Carmona., et. al. *Michael Faraday: Un genio de la Física experimental*. , FCE-SEP. , México (1995), cap. IV. Colección la Ciencia desde México / 36, pp 65-72.
- Gerardo Carmona. et. al , *Michael Faraday: Un genio de la Física experimental*. FCE- SEP. , México (1995), cap. IV. Colección la Ciencia desde México / 136, México, pp. 77-82.
- Einstein, Lorentz, Weyl, Minkowski. , *The principle of relativity*. , Dover, New York (1952)
- French, A. P. *Relatividad Especial*. , Reverté, S. A. , España, (1991), cap. 2.
- Hecht, E. , Zajac, A. , *Óptica*. ,. Fondo Educativo Interamericano S. A. (1977), cap. 1.

- Holton, Gerald. , *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*. Segunda edición, revisada y ampliada por Stephen G. Brush. Reverté (1981), cap. 23, 24, 25.
- Resnick, Robert. *Introducción a la teoría especial de la relatividad*. Limusa, México (1981), pp 17.
- Sánchez Ron, J. M. , *El origen y desarrollo de la relatividad*. Alianza Editorial (AU 362), Madrid, (1983), pp 65-66.,
- Shahen Hacyan., *Relatividad para principiantes*. FCE.-SEP, México (1989), cap. II, Colección la ciencia desde México / 78.
- Smith, James H. *Introducción a la relatividad especial*. Reverté, S. A. España, (1978), cap. 2.
- Trippler, P .A . *Física*, vol. 1, tercera edición, Reverté, S. A. , España, p. 89 (1986).

### CAPITULO III

- Arons, Arnold B. *Evolución de los conceptos de la física*. Editorial Trillas, México, (1970), cap. 36.
- Berkson, William. *Las teorías de campos de fuerzas. Desde Faraday hasta Einstein*. Alianza Editorial (AU310)), (1985), cap. 9.
- Einstein, A. , Grunbaum, A. , Eddigton, A. S. *La teoría de la relatividad: Sus orígenes e impacto sobre el pensamiento moderno*. Alianza editorial, (AU62), pp. 51-61, México, (1986).

- French, A. P. *Relatividad Especial*. Barcelona (1991), cap. 2.
- Ley Koo, E. , *El electrón Solitario*. FCE-SEP, colección La ciencia para todos / 165, México, pp. 37-44, (1999).
- Resnick, Robert *Introducción a la teoría especial de la relatividad*. Limusa, México (1981), pp 116-117
- Sánchez Ron, J. M. *EL origen y desarrollo de la relatividad*. Alianza Editorial (AU362), cap 3.

#### CAPITULO IV

- Berkson, William. *Las teorías de los campos de fuerzas. Desde Faraday hasta Einstein*. Alianza Editorial (AU310), Madrid (1985), cap. 10.
- Einstein, A. et. al. *The principle of Relativity.*, Dover, New York, pp. 35-65 (1952)
- Einstein, A. Grunbaum, A. Eddington, A. S. , *La teoría de la relatividad*. Alianza Editorial (AU62), México, (1986), pp. 95-104.
- Einstein, A. , Infeld, L. , *La física, Aventura del pensamiento*. Lozada, S. A. , Buenos Aires, (1939), cap. III.
- French, A.P. *Relatividad Especial*. Barcelona (1991), cap 1
- Holton, Gerald. *Ensayos sobre pensamiento científico en la época de Einstein*. Alianza Editorial (Au315), Madrid, (1982) cap. 5.
- Sánchez Ron, J. M. *El Origen y desarrollo de la relatividad*. Alianza Editorial (AU362), Madrid (1983), cap. 4.

- Sánchez Ron, J. M. A. *Einstein, Cartas a Mileva*. Mondadori, España (1990)
- Shahan Hacyan. *Relatividad Especial para estudiantes de física*. FCE., México (1995), cap. IV
- Strelkov, S. *Mecánica*, Mir, Moscú (1978), cap XVII.
- Trippler, P. A. , *Física, vol. II, tercera edición*. Reverté, S. A. España (1996), cap. 34.
- Yavorski, B . B. , Pinski, A. A. , *Fundamentos de Física I.*, Mir, Moscú (1983). Cap.12.

## CAPITULO V

- Golberg, Stanley. , *Understanding Relativity. Origen and Impact of Scientific Revolution*. Birkhauser, Boston, pp.179-289 (1984).
- Filardo Bassolo, J. M. , *Crónica de la Relatividad Restringida*. Contactos, vol. IV, número 1, México (1989).
- Sánchez Ron, J. M. , *El origen y desarrollo de la Relatividad*, Alianza Editorial (AU362), Madrid, pp. 75-81 (1983).