

**ACERCAMIENTO A LA RELATIVIDAD ESPECIAL A PARTIR DE SU  
HISTORIA Y NOCIONES DE EQUIVALENCIA ENTRE MASA Y ENERGIA**

Duván Felipe Gualteros Rojas

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL  
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Licenciatura en Física

Bogotá D.C

2023

**ACERCAMIENTO A LA RELATIVIDAD ESPECIAL A PARTIR DE SU  
HISTORIA Y NOCIONES DE EQUIVALENCIA ENTRE MASA Y ENERGIA**

**Duván Felipe Gualteros Rojas**

Asesor:

**Juan Carlos Castillo Ayala**

**Monografía para optar al título de Licenciado en Física**

Universidad Pedagógica Nacional

Facultad de Ciencia y Tecnología

Licenciatura en Física

Línea de profundización:

Enseñanza de la física desde una perspectiva cultural

Bogotá D.C

2023

## Contenido

INTRODUCCION.....	5
CAPITULO I.....	7
1.FUNDAMENTOS DEL TRABAJO.....	7
1.1 Formulación del Problema.....	7
1.2 Objetivos.....	11
1.2.1 Objetivo General.....	11
1.2.2 Objetivo Especifico.....	11
1.4 Antecedentes.....	11
1.4.1 Antecedentes Locales.....	11
1.5 Antecedentes Nacionales.....	13
1.6 Antecedentes Internacionales.....	14
CAPITULO II.....	15
2.MARCO TEORICO.....	15
2.1 Marco Disciplinar.....	15
2.2 El Origen de la TER.....	15
2.3 Sobre el espacio y tiempo en la relatividad.....	19
2.3.1 Espacio.....	19
2.3.2 Tiempo.....	22
2.4 Concepto de Equivalencia masa-energía.....	26
2.4.1 Masa en la TER.....	26
2.4.2 Energía en la TER.....	29
2.4.3 Fuerza en la TER.....	32
2.4.4 Causalidad.....	35
2.4.5 Causalidad en la TER.....	39
2.4.6 Equivalencia Masa-Energía.....	41
CAPITULO III.....	50
3.METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION.....	50

3.1 Metodología.....	50
3.2 Población.....	50
3.3 Propuesta de aula.....	51
3.3.1 Momento 1.....	51
3.3.2 Momento 2.....	52
3.3.3 Momento 3.....	53
Conclusiones.....	54
Bibliografía.....	56
Anexos.....	59

## Introducción

Este trabajo presenta un análisis conceptual de la teoría especial de la relatividad (TER), centrándose en la equivalencia entre masa y energía. Aunque la idea de equivalencia a menudo se asocia con la Teoría General de la Relatividad, en este estudio se explorará principalmente desde el marco de la TER, examinando cómo esta teoría sienta las bases para comprender la equivalencia, si bien en ciertos casos se abordarán de manera simple algunos conceptos de la teoría general el trabajo seguirá centrándose en la TER. En este trabajo se examinan temas clave como el espacio-tiempo, la masa, la fuerza y la energía, y se exploran factores históricos, conceptuales y físicos. Este enfoque permite una reflexión más profunda sobre la enseñanza de la relatividad en el contexto de la educación media.

La motivación para llevar a cabo este estudio surge de mi experiencia personal en el campo de la educación escolar. Durante mis años en grado décimo y once, así como en mis prácticas pedagógicas en el Colegio Nacional Nicolás Esguerra y al indagar en los estándares básicos de competencias en ciencias naturales del MEN respecto a la ciencia física, quedo en evidencia que la física moderna, y en particular la TER, no ha tenido reconocimiento en educación media. Conjuntamente se prescinde del abordaje de la enseñanza desde una perspectiva conceptual o histórica, lo cual es otro factor que me ha impulsado a realizar esta investigación. Siendo así el propósito del presente trabajo proporcionar herramientas que faciliten la reflexión y contextualización de la equivalencia masa-energía en la Teoría de la Relatividad, especialmente en su enseñanza en contextos académicos de educación media.

Este trabajo se divide en tres partes. En primer lugar, se plantea la problemática sobre la falta de interés en la enseñanza de conceptos de física moderna en el aula, que van más allá de los ya establecidos como la mecánica clásica. Luego, se presenta la justificación del estudio, que

se enfoca en la importancia de explicar en el aula el concepto de la equivalencia masa-energía en su contexto histórico. Por último, se establecen los objetivos que se abordarán en este trabajo, además de presentar los antecedentes de trabajos similares en esta temática que ayudan a mostrar la importancia del tema de este trabajo de investigación.

La segunda parte del trabajo se enfoca en los aspectos conceptuales e históricos de la TER, profundizando en los antecedentes que la precedieron y destacando los temas más relevantes que dieron lugar a la equivalencia entre masa-energía. A través de hechos históricos y conceptuales, se exploran las diferencias entre la física clásica y la moderna, destacando cómo la construcción de la ciencia no es un proceso lineal, sino que surge a partir de hipótesis y replanteamientos de teorías anteriores para dar cabida a nuevos conceptos.

Por último la tercera parte del trabajo se centra en el desarrollo una propuesta de aula basada en momentos cuidadosamente estructuradas. Cada momento tiene un objetivo específico y está diseñada para promover la participación de los estudiantes y su comprensión gradual del concepto de equivalencia masa-energía. Durante estos momentos, se emplearán diferentes actividades en clase que incluyen explicación de conceptos, discusiones grupales y resolución de problemas, con el fin de estimular el pensamiento crítico y la interacción entre los estudiantes.

La equivalencia masa-energía es un concepto esencial en la física moderna, propuesta por Einstein en su teoría de la relatividad, este concepto ha tenido un profundo impacto en la física y en nuestra comprensión del universo. Se da una propuesta de aula con el fin de facilitar la enseñanza de estos conceptos en la educación media, con el objetivo de contribuir al debate sobre la enseñanza de la física moderna en el aula y estimular la reflexión crítica sobre los desafíos y oportunidades que este tema presenta para la educación científica.

## CAPITULO 1. FUNDAMENTOS DEL TRABAJO

### Problemática

La física moderna, que incluye teorías como la relatividad, no tiene suficiente presencia en la educación actual. Los estudiantes rara vez tienen la oportunidad de discutir o reflexionar sobre los avances y desafíos de esta rama de la ciencia. En la vida cotidiana los estudiantes, suelen escuchar sobre físicos como Newton, Einstein o Hawking y conceptos como los agujeros negros, la mecánica cuántica y los viajes espaciales, pero sin comprender el contexto histórico y el significado profundo de estas ideas. Además, los temas relacionados con la física moderna no hacen parte de los estándares planteados por el MEN.

Los estándares básicos establecidos para educación media en ciencias se dividen en tres componentes: química, biología y física. En el componente de física la enseñanza se centra en conceptos y teorías clásicas de la física, como la Mecánica, Termodinámica, Mecánica de fluidos y Electromagnetismo, que se desarrollaron hasta finales del siglo XIX. Sin embargo, los avances posteriores en la física, especialmente en el siglo XX, se conocen como Física Moderna, que se enfoca en las concepciones relativistas y cuánticas, dichas teorías han tenido un gran impacto en la forma de pensar actual en la física y también en las tecnologías que se han desarrollado actualmente. Aun teniendo en cuenta esto no se incluyen en los estándares básicos de ciencias naturales.

Al reflexionar se puede pensar que las nuevas teorías son solo para personas con un entendimiento y capacidad intelectual muy alta, debido a la complejidad de esas, más sin embargo podemos notar que en la escuela se tratan temas como el mecanicismo y nociones propias de la mecánica de electromagnetismo, que también pueden ser consideradas complejas. Como se menciona

*La física moderna y contemporánea es considerada difícil y abstracta; no obstante, las investigaciones en enseñanza de la física han mostrado que la física clásica también es difícil y abstracta para los alumnos, que presentan serias dificultades conceptuales para comprenderla (Ostermann & Moreira, 2000, p. 392).*

En la actualidad, los estudiantes han tenido contacto con las teorías de la física moderna a través de diversos medios, como textos, películas y series, que las presentan de forma atractiva y accesible. Sin embargo, para comprender estas teorías de manera conceptual y crítica, se requiere una formación científica que parta del conocimiento previo de los estudiantes y los oriente hacia el análisis y la reflexión. Como señala el Ministerio de Educación Nacional (2006), se busca que “los y las estudiantes [aproximarse] progresivamente al conocimiento científico, tomando como punto de partida su conocimiento “natural” del mundo y fomentando en ellos una postura crítica que responda a un proceso de análisis y reflexión” (MEN, 2006; p. 14). Por lo tanto, es necesario diseñar estrategias didácticas pertinentes que faciliten el aprendizaje de las teorías de la física moderna, teniendo en cuenta los grados de abstracción que implican y que pueden no ser alcanzados en los niveles de educación media.

Una de las problemáticas que se presenta en la enseñanza de la física en la educación media es el no abordaje de la física moderna, que comprende las teorías relativistas y cuánticas que revolucionaron el pensamiento científico en el siglo XX. Estas teorías son fundamentales para comprender los fenómenos naturales y las tecnologías actuales, así como para desarrollar el pensamiento crítico y creativo de los estudiantes. Sin embargo, su enseñanza suele ser relegada por la dificultad matemática que implican o por la falta de recursos didácticos adecuados. En este sentido, se propone una aproximación a la TER de una manera

más conceptual, basada en un recorrido histórico y conceptual que parte de los trabajos de Newton y Einstein. Se busca así introducir conceptos como espacio, tiempo, velocidad de la luz, movimiento relativo y energía, que contrastan con la visión clásica de la física y que amplían la perspectiva de los estudiantes sobre el mundo. Como afirma “la escuela debería contribuir a que los estudiantes construyan una imagen del mundo físico más consecuente con aquella que tiene el mundo contemporáneo” (Grajales, 2017) (p. 10). Es de destacar, que los estándares en educación colombiana no contemplan las temáticas que ofrece la física moderna a pesar de que estos desarrollos no son tan recientes como se podría pensar, ya que se originaron hace más de cien años con los trabajos de Einstein y otros científicos. Sin embargo, aún no se han incorporado en los planes de estudio de la educación media, lo que implica una desactualización y una limitación en la formación científica de los estudiantes. Siendo también que la importancia de abordar física moderna en el aula no solo radica es la capacidad de esta en explicar fenómenos naturales que no pueden ser entendidos mediante teorías anteriores; sino porque plantea también cuestiones filosóficas y epistemológicas que fomentan el pensamiento crítico y reflexivo.

Surgiendo así la siguiente pregunta ¿Cómo abordar de una manera entendible teorías de física moderna? Siendo esto un asunto que llama la atención sobre las temáticas que se imparten en la escuela.

Al profundizar en la enseñanza de la física, se comprende que no solo la formulación matemática y teórica es lo que nos acerca a los conceptos, en la enseñanza se presentan a través de un desarrollo matemático complejo, pero hay otros aspectos igualmente importantes. Por ejemplo, los aspectos históricos y conceptuales que subyacen a las teorías,

los problemas de conocimiento y las concepciones del mundo físico que están presentes en el contexto en el que se plantean y construyen estas teorías.

Estos componentes son importantes para tener una comprensión profunda de los conceptos y teorías de la física, como es mencionado:

Las comprensiones que se abordarán en las temáticas planteadas en la construcción de la física moderna, pueden brindar un mejor aprendizaje de la física a los estudiantes. Por eso, resulta de interés considerar una aproximación conceptual desde el campo filosófico e histórico a estos contenidos (Grajales, 2017, p. 3).

Respecto al tema principal de la física moderna que en este caso es la equivalencia masa-energía se escogió debido a que es un concepto que implica la mirada en varios aspectos que se contraponen entre la física clásica y la moderna, como son los conceptos de masa, fuerza, energía, velocidad luz entre otros subyacentes.

Teniendo en cuenta lo mencionado, se planea por medio de un estudio de corte histórico conceptual enfocado en un tema en específico de la relatividad que en este caso sería la equivalencia entre masa y energía, realizar una propuesta de aula para aproximar a estudiantes de grado undécimo a la TER.

De esta manera surge la siguiente pregunta problema ¿Cómo implementar una propuesta de aula que permita aproximar a estudiantes de grado undécimo a la física moderna por medio de la equivalencia masa-energía?

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Realizar un estudio de corte histórico conceptual sobre la equivalencia de masa y energía en la teoría de la relatividad, con el fin de hacer una propuesta de aula que permita aproximar a los estudiantes de grado undécimo a conceptos relativistas.

### **Objetivos Específicos**

1. Establecer un análisis de la información obtenida de la equivalencia masa energía en la teoría de la relatividad con el fin de configurar una ruta para su enseñanza.
2. Ordenar criterios para el diseño de una propuesta de aula con estudiantes de grado once sobre conceptos de equivalencia masa-energía en la teoría de la relatividad, basado en la experiencia previa de los estudiantes con el campo de la física para así poder establecer una didáctica que permita aproximarlos a estos conceptos.

## **Antecedentes**

### **Antecedentes Locales**

La preocupación por la enseñanza de temas relacionados con la física moderna ha dado lugar a diferentes trabajos de investigación como los siguientes.

Se ha encontrado un trabajo similar de Sánchez (2021) una monografía titulada “APROXIMACIÓN A LA TEORÍA ESPECIAL DE LA RELATIVIDAD A PARTIR DE LAS NOCIONES DE ESPACIO Y TIEMPO A ESTUDIANTES DE GRADO UNDÉCIMO”, con el tema de aproximación a la (T.E.R.) a partir de las nociones de espacio y tiempo a estudiantes de grado once. Este es un buen antecedente, ya que tiene una temática

bastante similar a la del presente trabajo de investigación, con diferencias en los enfoques, centrándose este en el espacio y el tiempo. También se asemeja por ejemplo, en la parte de la TER, utiliza una aproximación para los estudiantes basada en la filosofía de los conceptos abordados.

El trabajo de Guayara (2017) también monografía con el título “LA ENSEÑANZA DE LA TEORÍA ESPECIAL DE LA RELATIVIDAD: REGLAS FIJAS Y RELOJES CON ESTUDIANTES DE GRADO SÉPTIMO”, su temática es de introducir a estudiantes de grado séptimo conceptos de la TER. En este trabajo se llevó a cabo una propuesta de aula referente a llevar la TER por medio del concepto de espacio tiempo a partir de reglas fijas con relojes; en este trabajo se puede evidenciar que temas de física moderna si pueden captar la atención de los estudiantes. Una de las reflexiones de este trabajo “Se responde a los planteamientos que se encontraron en la descripción de la problemática y a la pertinencia de los trabajos que en distintos contextos que vienen concretando experiencias de aula sobre las teorías de la física moderna aplicada a la enseñanza, lo cual es muy pertinente y novedoso en la escuela” (Guayara, 2017, p. 67)

Podemos notar como es un buen referente en cuanto al desarrollo de estrategias y actividades en el contexto de llevar un poco de ciencia actual en la escuela.

Otro es el trabajo monografía de Acosta (2017) titulado “DISEÑO DE UNA SECUENCIA DIDÁCTICA PARA INTRODUCIR ALGUNOS CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL A PARTIR DEL ANÁLISIS DE LA GEOMETRÍA DE MINKOWSKI”, un trabajo también con la finalidad de introducir conceptos de la TER dirigido a estudiantes de colegio, este trabajo tiene la intención de que los profesores puedan enseñar conceptos de relatividad mediante una secuencia didáctica basada en el análisis de

la geometría de Minkowski. Al igual que los trabajos anteriores, se concentra en el desarrollo del concepto de espacio-tiempo según la TER.

### **Antecedentes Nacionales**

A continuación, se presentan algunas investigaciones realizadas en el país que tienen una temática similar a la de abordar la física moderna en el contexto escolar. Estas investigaciones pueden servir como referencias para el trabajo, ya que comparten el mismo marco de referencia nacional.

El trabajo de investigación, monografía hecha por Jaramillo, Arroyave & Higueta (2012) titulada “UNA APROXIMACIÓN AL DESPERTAR DE LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA EN EL NIVEL MEDIO EN COLOMBIA”, en este trabajo se plantea buscar es una aproximación a la enseñanza de la física en el nivel medio en Colombia y hacer un aporte pedagógico y diseñar una didáctica que genere para el currículo en física de educación media la implementación de la enseñanza de la TER, si bien la relatividad no es el eje principal en este trabajo si no el abordaje de teorías diferentes a las siempre vista en los colegios los cuales son de física clásica, supone un antecedente con temática similar en los aspectos de abordaje de la TER y una propuesta para el acercamiento a ciencias más actuales en el ámbito del colegio colombiano.

Otro trabajo a nivel nacional es el hecho por López & Urrego (2012) también monografía titulado como PROBLEMÁTICAS EN EL PROCESO DE ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE DE LA TEORÍA ESPECIAL DE LA RELATIVIDAD CON RESPECTO A LOS MAESTROS EN FORMACIÓN DE LA LICENCIATURA EN MATEMÁTICAS Y FÍSICA DE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA”, este trabajo plantea la problemática

del proceso de la enseñanza de la TER en este caso para estudiantes en formación a ser maestros de la licenciatura en matemáticas y física, si bien no está dirigido al implementar contenidos de la TER en el contexto del colegio, diseña una investigación respecto a los problemas para la enseñanza de dicha teoría. El aporte metodológico de este trabajo es el de revisar la enseñanza de la física moderna que esta implica en cualquier nivel educativo.

### **Antecedentes Internacionales**

Para conocer y ampliar el punto de vista de una manera más global la situación actual del abordaje de contenidos de la física moderna en diferentes niveles de educación fuera del contexto del país, se observan dos trabajos que nos dan nociones en cuanto a la implementación de nuevos temas en el aula de clase.

El trabajo hecho por Fernández (2014), una tesis titulada “Teorías y modelos en la enseñanza -aprendizaje de la Física Moderna” que abarca las teorías y modelos de la enseñanza y aprendizaje de la física moderna y plantearla como una necesidad curricular, siendo un trabajo principalmente enfocado en la problemática argentina de hacer cambios en la estructura curricular de los temas que ven los jóvenes en los colegios con respecto a las nuevas teorías en ciencias y más específicamente de la física, pasando por la relatividad y la cuántica como una necesidad que se presenta en la actualidad. Este trabajo ayuda a la observación de estas propuestas relacionadas con el cambio de temáticas vistas en clases, no dejando de lado las teorías clásicas pero si mostrando una necesidad de implementar nuevas teorías.

Por último la investigación hecha por Arriasseccq & Grega (2001), artículo titulado “ALGUNAS CONSIDERACIONES HISTÓRICAS, EPISTEMOLÓGICAS Y

DIDÁCTICAS PARA EL ABORDAJE DE LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL EN EL NIVEL MEDIO Y POLIMODAL” en este trabajo se muestran una serie de consideraciones en cuanto a los aportes de la historia, filosofía y didáctica de la ciencia para el abordaje de la TER en la secundaria. Se presenta como un trabajo en el desarrollo de la didáctica para abordar la TER, lo cual aporta a la previsualización de las dificultades que tiene el abordaje de conceptos relativistas, teniendo en cuenta los conocimientos previos de los estudiantes, y las dinámicas en el aula de clase en la implementación de nuevos contenidos.

## **CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO**

Para el desarrollo del trabajo se abordarán los siguientes elementos teóricos para que con base en estos se pueda orientar la investigación. El presente trabajo tiene como objetivo *Realizar un estudio de corte histórico conceptual sobre la equivalencia de masa y energía en la teoría de la relatividad, con el fin de hacer una propuesta de aula que permita aproximar a los estudiantes de grado undécimo a conceptos relativistas.*

Por tal motivo los aspectos disciplinares tratados a continuación ayudaran en la comprensión de dichos conceptos, para ello se tomará en cuenta aspectos conceptuales e históricos.

### **Marco Disciplinar**

#### **Origen de la TER**

En el contexto de la evolución de la física a finales del siglo XIX, uno de los referentes clave fue Maxwell quien a finales del siglo XIX, establece que las ondas electromagnéticas se propagan en el vacío a una velocidad constante e invariable, que coincide con la velocidad

de la luz. Esta velocidad es independiente de las propiedades eléctricas y magnéticas del medio en el que se propagan las ondas. Sin embargo, en esa época se creía que existía un medio hipotético llamado éter, que llenaba todo el espacio y que era necesario para la transmisión de las ondas electromagnéticas.

A principios de este siglo, muchos fenómenos electromagnéticos eran ampliamente conocidos, como las cargas que se atraen y se repelen, junto con las ecuaciones que describen estos efectos. Sin embargo, en ese momento, el magnetismo y la electricidad se consideraban como ciencias separadas. Fue gracias a los descubrimientos de Michael Faraday (1791-1867), quien demostró que las corrientes eléctricas generan efectos magnéticos y que los imanes en movimiento producen electricidad, y las ecuaciones de James Clerk Maxwell (1831-1879) y Heinrich Hertz (1857-1884) que se logró establecer una conexión entre ambos fenómenos.

Estos avances experimentales con las ondas electromagnéticas de Maxwell, especialmente en la generación de ondas de radio, sentaron las bases de la teoría electromagnética y abrieron el camino a nuevas teorías. Las ecuaciones de Maxwell, formuladas en el siglo XIX, pudieron describir el comportamiento de las ondas electromagnéticas, entre las que se encuentra la luz. Sin embargo, esta constancia de la velocidad de la luz planteaba una contradicción con la mecánica clásica, que predecía que la velocidad de la luz debería variar según el sistema de referencia inercial.

Posteriormente, Michelson y Morley desarrollaron un experimento para medir la velocidad de la luz en diferentes direcciones, utilizando la Tierra como "cohete", es decir en un sistema de referencia inercial en movimiento respecto al éter, un supuesto medio que se creía que llenaba todo el espacio y que era necesario para la propagación de las ondas

electromagnéticas. Sin embargo, no se observaron diferencias en la velocidad de la luz en ninguna dirección, lo cual contradecía las predicciones de la mecánica clásica, lo que causaría un cuestionamiento sobre la existencia del éter como medio de referencia absoluto.

Estos experimentos ópticos de Michelson generaron una crisis en la física. El experimento de Michelson-Morley, realizado en 1887, fue un hito crucial en la historia de la física, ya que desafió las expectativas establecidas sobre el éter luminífero y generó una profunda crisis en la física teórica, ya que intentaban medir el tiempo que tardaba un rayo de luz en moverse de un punto a otro en la superficie de la Tierra, parafraseando Michelson buscaba métodos para determinar el movimiento de los cuerpos en relación con el espacio absoluto, donde el éter era el marco de referencia preferido, basándose en los tiempos medidos por dos rayos de luz que se interferían entre sí, en lugar de seguir una sola trayectoria como lo suponía Maxwell (Díaz, 2011). Se esperaba que los tiempos variaran si el rayo se movía en la misma dirección que el movimiento de la Tierra con respecto al éter o en sentido contrario. Sin embargo, los resultados mostraron que los tiempos eran siempre los mismos, lo cual contradecía las expectativas y planteaba interrogantes sobre la existencia del éter, que se suponía que era un medio inmóvil e invariable por el que se propagaba la luz.

Esta crisis impulsó a los físicos a buscar soluciones, ya que no solo afectaba la óptica, sino también la explicación de fenómenos electromagnéticos en general, creando dificultades para desarrollar una electrodinámica coherente. Se propuso una teoría que consideraba que el éter permeaba todo el espacio y era el medio para los fenómenos electromagnéticos y ópticos, buscando establecer una relación entre estas dos teorías.

Sin embargo, esta teoría presentaba falencias al tratar de explicar satisfactoriamente la electrodinámica de los cuerpos en movimiento, problemas como la permeabilidad magnética,

lo cual implicaba que el éter y la materia se movían simultáneamente y generaban un coeficiente de arrastre. Con el objetivo de desarrollar una teoría más sólida, se recurrió a la teoría de Maxwell, lo cual llevó al físico H. Lorentz a presentar un artículo titulado "La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants". En este artículo, Lorentz buscaba encontrar una formulación de las ecuaciones de Maxwell que fuera aplicable a un sistema en movimiento con respecto al éter. Para lograr esto, implementó una transformación en la coordenada temporal que se alejaba del concepto newtoniano de un tiempo absoluto. Esta transformación se utilizó como un método matemático para facilitar la resolución de las ecuaciones. (Los detalles sobre las transformaciones de Lorentz se encuentran en el ANEXO No1).

El filósofo y físico Ernst Mach (1838-1916) tuvo un papel relevante en la formulación de la TER, ya que Einstein se inspiró en su obra. Einstein reformuló en gran parte las ideas de Mach y planteó el Principio de Mach, que establece que la masa inercial no es una característica intrínseca de un cuerpo, sino una medida de su interacción con el resto del universo. Más adelante, Einstein se dio cuenta de que estas ideas, centradas en sensaciones y su carácter empírico, tenían poco que ver con el trabajo en física. A pesar de esto, estos pensamientos impactaron a Einstein y le llevaron a concluir que no existe un tiempo ni un espacio absoluto. Así, pudo generalizar la idea de Mach y demostrar que todas las fuerzas son relativas, lo que condujo al desarrollo de una nueva teoría de la gravitación capaz de explicar los movimientos planetarios de manera más precisa que la teoría clásica.

Estas ideas sentaron las bases para el surgimiento de una nueva teoría que ofrecía soluciones a los problemas físicos y filosóficos planteados. Sin embargo, era necesario abandonar la noción del éter como un medio físico, ya que este presentaba dificultades para representar

los fenómenos observados en la naturaleza. Las ideas que surgieron de la revisión crítica de la noción del éter como un medio físico dieron inicio de una revolución en la comprensión del universo. Estas nuevas perspectivas, sentaron las bases para el surgimiento de una nueva teoría que abordaría los problemas físicos y filosóficos planteados. La equivalencia masa-energía, que da lugar a la invarianza de las leyes en la física, revela la dinámica intrínseca del concepto de espacio en la relatividad especial.

## **Sobre el espacio y tiempo en la relatividad**

### **Espacio**

La equivalencia masa-energía, que establece que las leyes de la física son invariantes en sistemas de referencia con velocidad constante, tiene implicaciones fundamentales. Esto significa que el espacio no es una entidad estática, sino que varía de acuerdo con el movimiento del sistema. de referencia. De esta manera, el concepto de espacio es relevante en la comprensión de la relación entre masa y energía.

En 1905 el físico Albert Einstein publica un artículo con el nombre de “On the electrodynamic of moving bodies” (Einstein, 1905), en el cual se plantea una solución a los problemas anteriormente mencionados pero dejando la física clásica de lado y también consideraciones de espacio tiempo clásicas ya que como menciona:

Se sabe que cuando la electrodinámica de Maxwell – tal como se suele entender actualmente – se aplica a cuerpos en movimiento, aparecen asimetrías que no parecen estar en correspondencia con los fenómenos observados, estas asimetrías se refieren en física a una falta de equilibrio o simetría en un objeto o sistema, lo que puede llevar a una distribución desigual de la fuerza o una violación de las simetrías en las leyes

fundamentales de la física. Pensemos, por ejemplo, en la interacción electrodinámica entre un imán y un conductor (Einstein, 1905, p. 1).

Einstein se cuestiona el movimiento de estos dos objetos y plantea la siguiente dificultad: ¿Qué sucede si ambos objetos se mueven relativamente uno respecto al otro? ¿Se induce un campo eléctrico en ambos casos? ¿Cómo se determina cuál es el objeto que está en reposo y cuál es el que se mueve? Estas preguntas ponen en evidencia la influencia del pensamiento de Mach sobre Einstein, quien rechaza la idea newtoniana de que el espacio es absoluto e inmutable y existe en sí mismo. Para Einstein, el espacio no es una entidad real y objetiva que exista independientemente de los objetos que lo ocupan, sino que es una construcción relativa que depende del estado de movimiento del observador. Parafraseando según Newton, el espacio tenía tres dimensiones y se extendía sin límite, y las estrellas se mantenían quietas y en armonía para siempre por la fuerza de la gravedad (Suau, 2012). Newton concebía el espacio absoluto como una entidad inmutable, independiente de los objetos que contenía, uniforme en todas sus partes y con tres dimensiones. Este espacio servía como el único marco de referencia para determinar el movimiento de los objetos, mientras que el espacio relativo medía cómo ocupaba un cuerpo en movimiento el espacio absoluto, pudiendo variar según dicho movimiento.

Para Einstein en la TER la velocidad de la luz es constante en cualquier marco de referencia, independientemente del movimiento de la fuente o del observador. Esto conlleva a que el observador influya en cómo percibe la distancia y el tiempo en función de su movimiento, lo que implica que el espacio y el tiempo son relativos y cambian según el punto de vista. Además, no existe una única forma de determinar si un objeto está en reposo o en movimiento, ya que depende del marco de referencia elegido.

Mach sostenía que el espacio no tenía una existencia absoluta ni independiente, sino que su definición se basaba en las relaciones entre objetos en movimiento. Según esta perspectiva, el espacio no tenía entidad propia y su configuración dependía de los objetos y del marco de referencia utilizado para medir su posición y movimiento. Mach abogaba por que las medidas de espacio y tiempo se basaran en observaciones empíricas en lugar de conceptos abstractos. Esta del espacio era compartida por Einstein, quien también rechazaba la idea de un espacio absoluto e invariable.

Según Mach, el conocimiento del mundo solo era alcanzable a través de las sensaciones, donde lo verdadero radica en aquello que se percibe, como expresó Nieto. “Mach pone como ejemplo los recuerdos, las representaciones, sentimientos, voluntades y conceptos, que están formados por trazas dejadas por las sensaciones y que entonces pueden ser comparados a éstas” (Nieto, 2021, pág. 31). Teniendo en cuenta las posturas anterior mente mencionadas que influyeron sobre Einstein se concebirían estos ejemplos como el imán y el conductor y los intentos de demostrar el medio de propagación de la luz “permiten suponer que no solamente en mecánica sino también en electrodinámica ninguna de las propiedades de los fenómenos corresponde al concepto de reposo absoluto” (Einstein, 1905, pág. 1).

A diferencia de la mecánica newtoniana que considera el espacio como un objeto físico que se puede medir, en la teoría de la relatividad se entiende el espacio como una medida que se hace sobre un objeto que tiene la propiedad de la extensión. La medición del espacio permite comprender la experiencia que se percibe a través de los sentidos.

Según la TER, el espacio y tiempo son dos aspectos de una misma realidad, el espacio-tiempo, el cual es donde se desarrollan los fenómenos físicos. La TER establece que las leyes de la física son iguales para todos los observadores que se mueven a velocidad constante,

llamados inerciales. Esto conlleva que el espacio y el tiempo no son fijos, sino que varían según la velocidad relativa entre el observador y lo observado. Por ejemplo, si un objeto viaja a velocidades cercanas a la de la luz, su tiempo transcurre más lento y su longitud se acorta respecto a un objeto que está quieto. Este fenómeno se conoce como dilatación del tiempo y contracción de la longitud, respectivamente. Se deben a que la velocidad de la luz es constante para todos los observadores inerciales, sin importar su velocidad relativa. Para que esto sea así, el espacio y el tiempo tienen que adaptarse de forma que la luz siempre recorra la misma distancia en el mismo tiempo, de acuerdo con la fórmula  $c = \frac{d}{t}$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz,  $d$  es la distancia y  $t$  es el tiempo. Entonces, si dos observadores miden distancias distintas para un mismo trayecto de luz, también tienen que medir tiempos distintos para ese trayecto. De esta manera, el espacio y el tiempo se expanden o contraen según la velocidad del observador, lo que demuestra que están relacionados entre ellos y con el movimiento. Al reconocer que el espacio y el tiempo están interrelacionados, se plantea la relevancia de revisar a fondo el concepto de tiempo, para una mejor comprensión de los fenómenos relativistas. Esta interdependencia se manifiesta en la equivalencia masa-energía, la cual se apoya en la constancia de la velocidad de la luz en el vacío. Este principio, que desafía la concepción clásica del tiempo absoluto, implica que la dilatación del tiempo es una consecuencia natural del movimiento relativo.

## **Tiempo**

El concepto de tiempo es relevante para contextualizar el concepto de equivalencia masa-energía, ya que, se basa en el principio de que la velocidad de la luz es constante en el vacío, independiente del movimiento de la fuente o del observador. Esto implica que el tiempo no es absoluto, sino que depende del estado de movimiento del sistema de referencia. Así, dos

observadores que se mueven con velocidades diferentes experimentan el tiempo de forma diferente, lo que se conoce como dilatación del tiempo. Esto afecta a la medida de la masa y la energía de los objetos, que también son relativas al observador.

Un observador inercial es aquel que se mueve con velocidad constante respecto al espacio absoluto. Según Newton, todos los observadores inerciales son equivalentes en cuanto a la dinámica y a la propagación de la luz. Según esta visión, la velocidad de la luz es la misma en todas las direcciones, independientemente del estado del observador inercial. Newton estableció que tanto el tiempo como el espacio pueden ser absolutos o relativos. Como es mencionado por Niño:

El tiempo para Newton es absoluto en el sentido de que su fluir es continuo, regular, (fluye uniformemente) real e incondicionado como el espacio absoluto. Así como el espacio es condición necesaria para que los cuerpos puedan existir, el tiempo absoluto es condición necesaria para que los cuerpos puedan cambiar. Esto último querría decir que si existiese materia pero no el tiempo, la materia sería inerte, no cambiaría o sea que sería inmutable (Niño, 2001, p. 28).

En la filosofía de Newton, el tiempo se divide en absoluto y relativo. El tiempo absoluto se considera como un flujo uniforme e invariable, independiente de influencias externas, a menudo denominado "duración". El tiempo relativo, en contraste, era una medida dependiente del movimiento de los cuerpos y se utilizaba en lugar del tiempo absoluto en situaciones cotidianas, como días, meses o años. A pesar de las variaciones en el movimiento, el flujo del tiempo absoluto se mantenía constante e inmutable.

En la TER de Einstein implica que el tiempo no es un concepto absoluto, sino que depende del movimiento del observador. Esto conduce a la dilatación del tiempo, donde un reloj en movimiento avanza más lentamente que uno en reposo desde la perspectiva de este último. Por lo tanto, dos relojes inicialmente sincronizados pueden desincronizarse si uno se mueve a alta velocidad en relación con el otro. Sin embargo, esto no contradice el principio de la constancia de la velocidad de la luz, que establece que la velocidad de la luz es constante en el vacío para cualquier observador inercial, sin importar su velocidad relativa.. Einstein afirma que al hablar sobre tiempo establecemos juicios sobre sucesos simultáneos como es mencionado:

Cuando queremos describir el movimiento de un punto material, especificamos los valores de sus coordenadas en función del tiempo. Sera necesario tener en cuenta que una descripción matemática de esta índole tiene un sentido físico solamente cuando con anterioridad se ha aclarado lo que en este contexto se ha de entender bajo “tiempo”. Debemos tener en cuenta que todas nuestras afirmaciones en las cuales el tiempo juega algún papel siempre son afirmaciones sobre eventos simultáneos (Einstein, 1905, p. 2).

Para Einstein el concepto de tiempo está relacionado con la simultaneidad de eventos, es mencionado por Niño "Einstein construye nuevos conceptos de espacio-tiempo abandonando la perspectiva metafísica de Newton; para ello parte de la medición de intervalos temporales y de distancias entre eventos por observadores con distintos estados de movimiento"(Niño, 2001, p. 30). Si dos eventos ocurren simultáneamente, entonces se puede asignar un valor al tiempo en que ocurren. Esto se puede observar en la llegada de un tren a una estación y la posición de las manecillas del reloj. Si estos dos eventos son simultáneos, entonces la

posición de las manecillas del reloj asignará un valor al tiempo en que llega el tren a la estación. Sin embargo, la calificación de si dos eventos son simultáneos o no depende de las condiciones en que se haga la medición de estos eventos. En otras palabras, la simultaneidad de eventos y, por lo tanto, el concepto de tiempo, no son absolutos e independientes, sino que dependen del marco de referencia utilizado para medirlos. Esto llevo a la idea que el tiempo y el espacio están relacionados y se consideran una entidad única conocida como espacio-tiempo. En el libro "El Universo Elegante" de Brian Greene se dice que:

En la teoría especial de la relatividad, el tiempo ya no fluye independientemente del espacio, sino que es tan maleable y flexible como el espacio mismo. El tiempo y el espacio están indisolublemente unidos, y cualquier evento que ocurra en el universo sucede en un punto específico en el espacio-tiempo. En resumen, la relatividad especial afirma que el espacio y el tiempo son una sola entidad, el espacio-tiempo, y que la descripción de la realidad depende del observador y de su movimiento a través del espacio-tiempo (Greene, 2000, p. 14).

La relatividad del tiempo implica que dos eventos que parecen simultáneos para un observador pueden no serlo para otro que se mueve a una velocidad diferente. Además, la velocidad a la que se mueve un objeto afecta tanto al tiempo como al espacio que experimenta. Si un objeto se mueve a una velocidad cercana a la de la luz, el tiempo parece disminuir en relación con un objeto que está en reposo. En resumen, el tiempo se convierte en una entidad que cambia dependiendo de la velocidad y el movimiento del observador en el espacio-tiempo. Este cambio de paradigma no solo afecto nuestra comprensión del tiempo, sino que también influye en otros aspectos fundamentales de la física, como el concepto de masa.

## Conceptos de Equivalencia masa-energía

### Masa en la TER

A lo largo de la historia, el concepto de masa ha sido definido y comprendido de diferentes maneras. En la antigua Grecia, la masa se consideraba una propiedad fundamental de la materia. Con la llegada de la revolución científica en el siglo XVII, se desarrolló una nueva comprensión de la materia y de la masa. Los científicos de esta época creían que la masa era una propiedad intrínseca de un objeto, ya que no depende de factores externos, sino que es una propiedad inherente al objeto en sí mismo. Este concepto fue utilizado por muchos años hasta que surgieron nuevas teorías en el siglo XX que ampliaron nuestra comprensión de la masa.

El concepto de masa en la TER difiere significativamente de la concepción clásica de la masa en la física. Según la física clásica, la masa se considera una propiedad intrínseca de un objeto que no varía con la velocidad, según las leyes de Newton, en su segunda ley se establece que la fuerza resultante que actúa sobre un objeto es directamente proporcional a su masa y a su aceleración, lo que se puede expresar matemáticamente como  $F = ma$ . En consecuencia, la masa de un objeto tiene un efecto en la cantidad de fuerza requerida para acelerarlo, y también en su respuesta al cambio de la fuerza aplicada, como lo menciona Martínez:

Newton eligió asociar la fuerza con el cambio total de la cantidad de movimiento impartido en una acción particular. Es decir, si un cuerpo tiene una masa cuyo valor es grande, notamos que una fuerza determinada imparte una aceleración pequeña; de tal manera que es más difícil acelerar tal cuerpo que uno de masa inferior. Es así como

la fuerza es definida cualitativamente como una acción que imparte aceleración (Martínez, 2011, p. 9).

Según esta concepción de masa, se asume que la fuerza necesaria para acelerar un objeto es proporcional a su masa, lo que implica que un objeto más masivo requeriría más fuerza para moverse a la misma velocidad que uno más ligero. Sin embargo, en la TER, se utiliza la masa relativista en lugar de la masa clásica en las ecuaciones de movimiento. La masa relativista se considera una medida de la resistencia que ofrece un objeto a ser acelerado a velocidades cercanas a la de la luz, lo que significa que varía con la velocidad del objeto y se relaciona directamente con su energía cinética.

La masa relativista es un concepto de la física que surge a partir de la TER. A diferencia de la concepción clásica de la masa, en la TER es una forma de cuantificar la cantidad de energía que un objeto tiene en movimiento. A medida que la velocidad del objeto aumenta, también lo hace su masa relativista, lo que significa que se requiere más energía para acelerarlo aún más. En conclusión, la masa relativista es una medida de la resistencia que ofrece un objeto a ser acelerado a velocidades cercanas a la de la luz, y se relaciona directamente con la energía cinética del objeto. A diferencia de la concepción clásica de la masa, la masa relativista varía con la velocidad del objeto y es fundamental para la física moderna.

Para una mejor comprensión del concepto de masa en la TER, es necesario tener en cuenta tres conceptos relacionados con ella. Como se ha mencionado previamente, en la relatividad, la concepción de masa está relacionada con la energía, de tal forma que se convierte en una forma de cuantificar la energía que hay en un objeto en movimiento. Los tres conceptos para tener en cuenta son los siguientes:

**1.** La masa invariante, una propiedad esencial que no cambia con la velocidad, es constante en todos los marcos de referencia inerciales. Es una característica fundamental de un objeto y se conserva en cualquier interacción física. Por ejemplo, la masa invariante del electrón es constante, alrededor de  $9.11 \times 10^{-31} \text{kg}$ , sin importar su velocidad, ya esté en reposo o en movimiento a alta velocidad.

**2.** La masa relativista aparente en resumen y de una manera simple de observar es una medida de la masa de un objeto en movimiento según lo observado desde otro objeto en movimiento, y puede diferir de la masa invariante del objeto. En un sistema donde dos objetos se mueven a velocidades cercanas a la de la luz, la masa relativista de cada objeto se puede medir como una masa aparente desde el punto de vista del otro objeto. Esta medida aparente puede ser diferente a la masa invariante del objeto, que es la misma en cualquier marco de referencia inercial.

En otras palabras la masa aparente es la medida de la masa de un objeto tal como se percibe desde el punto de vista de otro objeto en movimiento, y esto se debe a los efectos de la TER, donde la velocidad de los objetos y el marco de referencia. pueden influir en cómo se mide la masa. Por ejemplo, si dos naves espaciales se mueven a altas velocidades en direcciones opuestas, cada una medirá la masa de la otra como una masa aparente. La nave que se aproxima medirá una masa aparente mayor que la masa invariante de la otra nave debido a los efectos de la TER.

**3.** La masa inercial aparente es una medida de la dificultad que presenta un objeto para cambiar su velocidad cuando se está moviendo dentro de un sistema de referencia. En otras palabras, es la masa que un objeto aparenta tener cuando es observado desde otro objeto en movimiento. Esto significa que la masa inercial aparente de un objeto puede ser diferente a

su masa inercial real, que es la medida de la resistencia al cambio de velocidad en su propio sistema de referencia en reposo. La masa inercial aparente se debe a la influencia de la velocidad relativa de los dos objetos en movimiento y se puede calcular utilizando la fórmula de la masa relativista.

La comprensión de la masa en este contexto no solo redefine la concepción tradicional, sino que también establece un vínculo fundamental con el concepto de energía. La energía, un concepto esencial en la física. La conexión intrínseca entre la masa relativista y la energía se convierte así en un componente crucial para entender la interrelación dinámica entre la materia y la energía en el marco de la TER.

### **Energía en la TER**

La energía es un concepto fundamental en la física, ya que está presente en casi todos los fenómenos observables. A lo largo de la historia, este concepto ha evolucionado y se ha adaptado a nuevas teorías. En la física clásica, la energía se definía como la capacidad de un objeto para realizar trabajo, es decir, para cambiar la posición de un objeto en un campo de fuerza. Se distinguían diferentes formas de energía, como la energía cinética, que se refiere a la energía asociada al movimiento de un objeto, y la energía potencial, que se relaciona con la posición de un objeto. Estos conceptos resultaban útiles para comprender y predecir el movimiento de los objetos en el espacio y el tiempo. Además, en la física clásica, la energía también se asociaba con la producción de calor y se conservaba en cualquier proceso físico.

En la TER el concepto de energía difiere de la física clásica y representa una nueva comprensión. En la TER, la energía se conserva, pero depende del estado de movimiento del observador.

Según Einstein, la ecuación  $E = mc^2$  establece una relación fundamental entre masa y energía, donde la masa no solo mide la cantidad de energía necesaria para crear o destruir masa, sino que es equivalente a la misma energía. Por ejemplo, cuando un átomo se divide, libera una gran cantidad de energía y pierde una pequeña cantidad de masa, que se convierte en esa energía. Lo mismo sucede cuando dos átomos se fusionan, la diferencia de masa se transforma en energía. Además de esta ecuación, se propone otra que describe la energía de un objeto en movimiento, ya que la ecuación anterior se refiere a la energía en reposo, si bien este concepto de energía en reposo sería muy útil como lo expresa Solbes y Tarin "Einstein en el desarrollo del concepto de energía es muy grande. La energía en reposo permitió explicar el origen de la energía desprendida en las desintegraciones radiactivas y reacciones nucleares" (Solves & Tarin, 2008, p. 175). La ecuación menos conocida se conoce como energía relativista o energía cinética, y se expresa de la siguiente manera:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

En esta ecuación, "m" representa la masa del objeto, "c" es la velocidad de la luz, "v" es la velocidad del objeto y "E" es la energía relativista. La ecuación indica que cuando un objeto se mueve a velocidades cercanas a la velocidad de la luz, su energía aumenta significativamente. Sin embargo, es importante destacar que un objeto masivo nunca puede alcanzar la velocidad de la luz, ya que su energía se volvería infinita.

El surgimiento del concepto de energía cinética en la TER se debió a la necesidad de una descripción más precisa de la energía de los objetos en movimiento a velocidades cercanas a la velocidad de la luz. A través de la fórmula de la energía cinética relativista, Einstein

demonstró que la relación entre la energía y la masa es muy diferente a lo que se entendía en la física clásica.

Para comprender mejor el concepto de energía relativista, consideremos un ejemplo simplificado en el que no se tienen en cuenta las complicaciones físicas asociadas con la aceleración de un objeto con una masa considerable a velocidades cercanas a la velocidad de la luz. Imaginemos dos trenes, uno en reposo y otro que se mueve a una velocidad cercana a la de la luz, respecto a un observador externo que está en el mismo marco de referencia que el tren en reposo. Supongamos que ambos trenes tienen masas iguales, y la energía cinética del tren en movimiento es de 10,000 Joules. Aplicando la fórmula de la energía cinética relativista mencionada anteriormente, podemos calcular su velocidad. Utilizando los valores del ejemplo, encontramos que la velocidad del tren en movimiento es aproximadamente 0.99999995 veces la velocidad de la luz, en otras palabras 299,792,452.67196 *m/s*. En este ejemplo podemos observar cómo la energía cinética de un objeto aumenta a medida que se acerca a la velocidad de la luz, y cómo esto tiene un impacto en la velocidad del objeto.

Sin embargo, en general desde la mecánica clásica cuanto mayor velocidad se tenga mayor energía cinética tendrá igual que desde la relatividad, entonces ¿cómo se compara esto con el ejemplo? y ¿En qué se diferencia la energía cinética desde la clásica y desde la relatividad?

La diferencia radica en que la fórmula clásica de la energía cinética  $k = \frac{1}{2}mv^2$  solo es válida para velocidades bastante menores que la velocidad de la luz, y no tiene en cuenta el efecto de la dilatación del tiempo y la contracción de la longitud que ocurren cuando un objeto se mueve a velocidades relativistas. La fórmula relativista de la energía cinética es más general y se reduce a la fórmula clásica cuando *v* es muy pequeña comparada con *c*. La fórmula relativista también muestra que cuando *v* se acerca a *c*, *K* tiende a infinito, lo que significa

que se necesita una cantidad infinita de energía para acelerar un objeto hasta alcanzar la velocidad de la luz. Por lo tanto, ningún objeto con masa puede viajar a la velocidad de la luz o más rápido.

### **Fuerza en la TER**

A lo largo de la historia, el concepto de fuerza ha tenido un papel fundamental en la física, y su evolución ha sido un proceso que ha llevado a importantes descubrimientos y cambios en nuestra comprensión del mundo físico.

Desde los primeros intentos de comprender el concepto de fuerza, en la antigua Grecia, hasta la física moderna, ha habido cambios significativos en la concepción y comprensión de la fuerza. En la antigua Grecia, filósofos como Aristóteles intentaron explicar el movimiento y la fuerza basándose en la observación y el razonamiento lógico. Aristóteles sostenía que el movimiento requería la aplicación constante de una fuerza para mantenerlo, lo que llevó a la creencia de que el movimiento natural se detendría en ausencia de una fuerza externa. Estas ideas fueron aceptadas en su época debido a su fundamento en la observación directa del mundo y la experiencia. Como se hace referencia en:

Aristóteles es uno de los máximos exponentes de la filosofía griega gracias a la deconstrucción que realiza de las ideas de algunos filósofos, que, según la Fundación Libre (2016) mantuvo diferencias filosóficas con varias escuelas de pensamiento, razón por la cual, instaura en su doctrina un esquema de pensamiento lógico (denominado silogismo) con el fin de comprender la naturaleza, puesto que, según él, las leyes de la naturaleza serían fácilmente deducibles si se apela a raciocinios lógicos, de modo que, bajo la observación directa del fenómeno y el razonamiento lógico, los

fenómenos de la naturaleza quedan, en este sentido, previamente determinados.  
(Sánchez, M. Á, 2021, p. 18).

Sin embargo, en el siglo XVII se produjo una revolución en la comprensión de la fuerza, gracias en gran medida a las contribuciones de Galileo Galilei e Isaac Newton. Galileo llevó a cabo experimentos detallados sobre el movimiento, sentando las bases para la formulación de las leyes del movimiento. Por su parte, Newton desarrolló las leyes del movimiento y la ley de la gravitación universal, estableciendo los fundamentos de la física clásica. Durante los siglos siguientes, la física clásica dominó los paradigmas científicos, y el concepto de fuerza se utilizó ampliamente para explicar fenómenos mecánicos y gravitatorios a escalas macroscópicas, es decir, fenómenos observables por los sentidos.

A diferencia de los griegos, Galileo y Newton propusieron que la fuerza era una cantidad vectorial que podía medirse y calcularse matemáticamente. Además, establecieron que la fuerza era una causa del cambio en el estado de movimiento de los cuerpos, y que este cambio dependía también de la masa de estos. Así, definieron la fuerza neta como el producto de la masa y la aceleración de un cuerpo, y la fuerza gravitatoria como el producto de las masas de dos cuerpos y una constante universal, dividido por el cuadrado de la distancia entre ellos.

El concepto de fuerza propuesto por Galileo y Newton fue tan ampliamente aceptado y aplicado en la comunidad científica ya que explicaba con precisión una gran variedad de fenómenos naturales que antes eran difíciles de entender o describir. Además, el concepto de fuerza se basaba en principios universales que eran válidos para todos los sistemas físicos, independientemente de sus condiciones particulares. El concepto de fuerza se apoyaba en métodos experimentales y matemáticos que permitían verificar y comprobar las hipótesis

y las leyes formuladas por los científicos. Estas características hicieron del concepto de fuerza un pilar fundamental para el desarrollo de la física clásica y sus aplicaciones prácticas.

Sin embargo, a medida que avanzaba el siglo XIX, se hicieron evidentes ciertas anomalías que no podían ser explicadas por la física clásica, como los resultados experimentales contradictorios en el estudio de la radiación electromagnética, como se mencionan en “la mecánica newtoniana, hacia finales del siglo XIX, empezaría a sufrir en cuanto a su nivel de validez en relación con otras teorías físicas, en particular, con el electromagnetismo.” (Sánchez, M. Á, 2021, p. 18). La física clásica no podía explicar algunos aspectos de la naturaleza de la luz y la materia, como el efecto fotoeléctrico y el espectro de emisión de los átomos. El concepto de fuerza, basado en la idea de una acción continua y proporcional a la distancia, no resultaba adecuada para describir estos procesos discretos e instantáneos que ocurrían a escalas pequeñas. Además, el concepto de fuerza implicaba una causalidad determinista, es decir, que el estado futuro de un sistema físico podía predecirse con exactitud a partir de su estado presente. Como se sustenta en “la acción a distancia presupone las nociones absolutas heredadas de la tradición newtoniana, lo que genera dificultades en la descripción física de algunos fenómenos, particularmente, los fenómenos eléctricos y magnéticos” (Sánchez, M. Á, 2021, p. 28).

Fue entonces cuando surgió la TER a principios del siglo XX, En la teoría el concepto de fuerza adquiere un significado diferente al de la física clásica. Dicha teoría como ya vimos anteriormente revolucionó la comprensión de los conceptos del espacio tiempo y la gravedad. En lugar de considerar la fuerza como una entidad fundamental que actúa sobre los objetos, la TER plantea una perspectiva más profunda sobre la interacción entre masa, energía y movimiento.

En el contexto de la equivalencia entre masa y energía, el concepto de fuerza se puede entender como la causa de los cambios en la energía y el momento lineal de un objeto. Según esta perspectiva, un objeto en movimiento posee una energía total que incluye su energía en reposo, que depende de la masa del objeto, y su energía cinética, que depende de su velocidad. Cuando se aplica una fuerza sobre un objeto, se produce una variación en su energía y su momento lineal, lo que implica modificaciones en su movimiento y trayectoria.

En la teoría de la relatividad, la gravedad no se considera una fuerza en el sentido clásico de la atracción entre cuerpos debido a sus masas y distancias. En cambio, se interpreta como una curvatura del espacio-tiempo causada por la presencia de masa y energía. Esta curvatura afecta las trayectorias de los objetos en movimiento, creando la apariencia de una fuerza gravitatoria. La reinterpretación del concepto de fuerza en la TER ha ampliado nuestra comprensión del universo y ha llevado al desarrollo de teorías más completas, como la relatividad general, que describen la gravedad en términos de la geometría del espacio-tiempo curvado. Este cambio de perspectiva resulta esencial al considerar la causalidad en el marco relativista. La causalidad emerge como un pilar fundamental para mantener la coherencia en la TER.

### **Causalidad**

La causalidad es fundamental para mantener la consistencia de la teoría de la relatividad, ya que impide que se produzcan paradojas temporales o violaciones de la ley de conservación de la energía. Por ejemplo, si un objeto con masa se convierte en energía radiante, esta energía debe propagarse a una velocidad menor o igual que la luz, para evitar que pueda influir en eventos pasados o crear bucles causales. Así, la causalidad garantiza que la equivalencia entre

masa y energía se cumpla de forma coherente y respetando las leyes físicas, por tanto es pertinente un repaso a este concepto.

La causalidad es un tema que ha sido recurrente en la historia de la filosofía y la ciencia, ha sido un concepto que se ido desarrollando desde la antigüedad hasta la actualidad. Desde la Antigua Grecia, los filósofos se interesaron en este concepto y el problema de la causalidad e intentaron explicar cómo funciona este proceso desde diferentes hipótesis. Aristóteles concebía una teoría de la causalidad que enfatizaba en cuatro causas las cuales son: la causa material, la causa formal, la causa eficiente y la causa final. Según esta concepción antigua, una causa material se refiere a la materia de la que está hecho un objeto es decir la sustancia material y la forma de algún cuerpo y la relación entre estos dos principios de la naturaleza es cuando la materia adquiere una forma específica, se convierte en una sustancia concreta y se manifiesta en el mundo físico. La causa formal se refiere a la forma que adquiere la sustancia de la que está hecho un objeto, es decir, al modo en que la materia se organiza y se diferencia de otras sustancias. La causa eficiente se refiere a la fuerza o agente que origina el objeto, es decir, al origen o principio del movimiento o cambio. La causa final se refiere al propósito o función que tiene el objeto, es decir, al fin o meta hacia el que tiende su movimiento o cambio. Como se sustenta en:

Aristóteles habla de cuatro tipos de causa: material, formal, eficiente y final. La causa material es la materia, aquello de lo que está hecho algo. Entendemos por causa formal lo que un objeto es o la forma específica que tiene. La causa eficiente es aquello que desencadena el proceso de desarrollo. Por último, la causa final es el destino que dirige el proceso, el fin al que tiende o puede llegar. (Terceiro, 2015, p. 193).

En la Edad Media los filósofos y teólogos cristianos utilizaron la causalidad para explicar la relación entre Dios y el mundo. Tomás de Aquino utilizó la causalidad basada en la concepción de Aristóteles, según su teoría, todas las cosas tienen una causa, y cada causa tiene su propio efecto. Él afirmó que Dios es la causa primera y última de todas las cosas, es decir, que Dios es la causa principal de todo lo que existe, y que todas las otras causas derivan de él. Sugiere que todas las cosas en el universo están interconectadas, y que cada evento tiene una causa y un efecto.

En la época moderna el concepto de causalidad se convirtió en un tema importante en la filosofía y la ciencia. Los filósofos como John Locke y David Hume se preguntaron cómo podemos estar seguros de que hay una relación causal entre dos eventos. Hume argumentó que no podemos estar seguros de que hay una relación causal, y que sólo podemos inferir una conexión causal a partir de la observación repetida de la misma secuencia de eventos. La causalidad por tanto sería un concepto relacionado en lo empírico en la experimentación de eventos, como se sostiene en “Los cuestionamientos tuvieron como punto de partida las ideas de David Hume en el siglo XVIII, cuando este planteó el tema en un minucioso análisis de dos partes. En la primera concluía que la causalidad es un concepto que se origina en lo empírico y no en la razón.” (Cortes, 2018: p. 4).

El concepto de causalidad en ciencias es relevante debido a que permite identificar patrones y regularidades en los eventos naturales, y de esta manera poder desarrollar teorías y modelos que expliquen cómo funcionan y se relacionan los fenómenos que se observan en la naturaleza. Sin la noción de causalidad no se podría tener una base para la inducción o la deducción, provocando así que el conocimiento científico no fuese suficientemente riguroso, ya que la causalidad parte de una postura realista, parafraseando, la idea de causalidad en el

primero se origina en una perspectiva realista que sostiene que la causalidad no es una categoría que relaciona ideas, sino una categoría que implica una conexión constante y una determinación que corresponde a una característica real del mundo (Cortes, 2018). La causalidad es importante para el desarrollo de la ciencia ya que permite establecer relaciones causales entre variables y de esta manera diseñar experimentos que permitan probar hipótesis y confirmar o refutar teorías.

En las ciencias, el concepto de causalidad es relevante porque desarrolla teorías y modelos que explican cómo funcionan y se relacionan los fenómenos observados en la naturaleza. Sin la noción de causalidad, no tendríamos una base para la inducción o la deducción, lo que debilitaría la rigurosidad.

En la física, la causalidad es un principio fundamental que se utiliza para explicar cómo funcionan las leyes naturales. La física clásica, se basa en la idea de que hay una relación causal entre los objetos y las fuerzas que actúan sobre ellos. La teoría de la relatividad de Einstein, por otro lado, introdujo una nueva concepción de la causalidad, en la que los efectos pueden preceder a sus causas en ciertas circunstancias. El concepto de causalidad afectó en el proceso de cambio de paradigmas que se dio a comienzos del siglo XX, “A la vuelta del siglo XIX al XX, connotados científicos preocupados por el derrumbe de la teoría de Newton, se abocaron a trabajar sobre los fundamentos de la nueva ciencia que emergía en esos años. Se revisaron y discutieron los conceptos básicos tales como el espacio, el tiempo y, por supuesto, el de causalidad” (Cortes, 2018: p. 17).

La teoría de la relatividad de Einstein, con su revolucionaria concepción de la causalidad, tuvo un impacto profundo en nuestra comprensión de la relación entre masa y energía. En

esta equivalencia de masa-energía hay una implicación que una pequeña cantidad de masa puede liberar una enorme cantidad de energía, como se observa en las reacciones nucleares. Además, Einstein demostró que el espacio y el tiempo no son absolutos, sino que dependen del estado de movimiento del observador. Esto significa que el orden temporal de dos eventos puede variar según el marco de referencia desde el que se observan, lo que plantea desafíos al principio de causalidad. Sin embargo, Einstein también estableció que la velocidad de la luz es constante e inalcanzable para cualquier objeto con masa. De esta manera, Einstein cambió la forma en que percibimos el universo y se convirtió en un pilar de la física moderna, demostrando la trascendencia del concepto de causalidad en la evolución de la ciencia.

### **Causalidad en la TER**

En cuanto a la visión de la causalidad en la relatividad, el astrofísico británico Chris Impey menciona:

En la teoría de la relatividad, la causalidad es una parte fundamental del tejido del espacio y el tiempo. La equivalencia entre la masa y la energía, que se deriva de la teoría, implica que los objetos masivos pueden afectar la curvatura del espacio-tiempo y, por lo tanto, influir en la causalidad de otros eventos en el universo (Chris Impey, 2012: p. 214).

La TER considera a la causalidad como un principio fundamental para explicar la relación entre los eventos en el universo. La causalidad en este contexto se refiere a la idea que los eventos tienen causas y efectos que están relacionados en el tiempo y en el espacio. Esto se conoce como principio de causalidad local, la cual se refiere a la idea de que los eventos en el espacio y el tiempo están relacionados entre sí, de manera que si un evento A causa un

evento B, entonces el evento A debe ocurrir antes del evento B. Es decir, la relación causa y efecto está limitada por la velocidad de la luz y la distancia en el espacio.

La TER introduce un nuevo concepto de causalidad en el que los efectos no pueden preceder a sus causas, conocido como el principio de causalidad de la TER. En esta teoría, los eventos no ocurren en un vacío, sino que están relacionados entre sí en el tiempo y en el espacio. Es importante tener en cuenta que en la TER, la causalidad no es absoluta, sino que depende de la posición y del movimiento del observador. Esto se debe a que la teoría describe cómo se comportan los objetos que se mueven a velocidades cercanas a la velocidad de la luz, lo que implica efectos como la dilatación del tiempo y la contracción de la longitud. Sin embargo, en ninguna circunstancia los efectos pueden preceder a sus causas.

En el caso de la equivalencia masa-energía, la causalidad juega un papel importante en la comprensión de cómo se relacionan estos dos conceptos. Por ejemplo, la masa y la energía pueden convertirse una en otra, pero esto sólo puede ocurrir si se cumple la ley de la conservación de la energía, la conservación de la energía y la masa se basa en el principio de causalidad local. Esto significa que la cantidad total de energía y masa deben ser conservadas, ya que, puede transformarse de una forma a otra. Por ejemplo, en el decaimiento radiactivo, una parte de la masa del núcleo se convierte en energía, que se emite en forma de radiación. La masa del núcleo disminuye, pero la energía aumenta, de modo que la suma de ambas se mantiene constante.

Si un objeto con masa se mueve a una velocidad cercana a la velocidad de la luz, su masa relativista se incrementa enormemente, por tanto su energía total aumenta. En este proceso, la diferencia entre la masa relativista y la masa en reposo se convierte en energía cinética, en palabras de Einstein "La energía cedida por el cuerpo se convierte en energía de

radiación no tiene relevancia, evidentemente, ya que nos conduce a una conclusión más general: La masa de un cuerpo es una medida de su contenido de energía" (Einstein, 1905: p. 3). Según la ecuación  $E = mc^2$ , donde "c" es la velocidad de la luz en el vacío con exponente 2. Por lo tanto, la causalidad que hay en la equivalencia masa-energía es la transformación de la masa en energía, y viceversa, a través de la relación entre la velocidad de la luz y la constante de proporcionalidad entre la masa y la energía en la ecuación  $E = mc^2$ . La constante de proporcionalidad en la ecuación es  $c^2$ . Esto significa que la energía "E" es igual a la masa "m" multiplicada por la velocidad de la luz al cuadrado. La velocidad de la luz al cuadrado es una cantidad exageradamente grande aproximadamente  $9 \times 10^{16}$  metros cuadrados por segundo cuadrado, lo que indica que una pequeña cantidad de masa puede ser transformada en una enorme cantidad de energía. Según Einstein

Esto significa que cualquier proceso de conversión de masa en energía debe ser explicado por una causa, y debe de cumplir con las leyes fundamentales de la física, incluyendo el principio de causalidad. La exigencia de la causalidad se vincula al paradigma relativista introducido por Albert Einstein, que sentó las bases para nuevas comprensiones y, en particular, abrió la puerta a la reconsideración de la equivalencia masa-energía.

### **Equivalencia Entre Masa y Energía**

Como ya ha sido mencionado anteriormente Albert Einstein publicó su famoso artículo revolucionario titulado "Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento" (Zur Elektrodynamik bewegter Körper) en 1905 que introduciría la TER. Este artículo sentó las bases para nuevas comprensiones y daría paso a redefinir varios conceptos de la física clásica como hemos ido viendo anteriormente, los conceptos que se vieron más afectados fueron los del espacio, el tiempo y el movimiento. Es de recalcar que dicho documento contenía los

postulados de la TER: el principio de relatividad y la constancia de la velocidad de la luz en el vacío.

Poco después de enviar dicho artículo para su publicación, Einstein se daría cuenta de que uno de los postulados tendría una implicación importante relacionada con la energía de los cuerpos el cual sería el segundo postulado, dado este percance publicaría otro artículo un poco después del anterior de tan solo tres páginas llamado "Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?" (Einstein, 1905), en español "¿Depende la inercia de un cuerpo de su contenido de energía?" en el cual abordaría esta cuestión.

En este segundo artículo, Einstein presentaría la ecuación que hemos venido viendo con anterioridad, la ecuación para la energía en reposo  $E = mc^2$ , la cual indica que la masa de un cuerpo es una forma de energía, y que existe una equivalencia. Resultó ser uno de sus más significativos hallazgos hasta aquel momento la que sería llamada: la equivalencia entre masa y energía.

Antes del descubrimiento de Einstein, varios científicos ya habían explorado la relación entre la masa y la energía. En el siglo XIX, se observaron reacciones químicas que liberaban calor y se reconocieron las fuerzas eléctricas entre electrones y protones. Científicos como Hermann von Helmholtz y Henri Poincaré también estudiaron la relación entre la masa y la energía en campos como la termodinámica y la teoría electromagnética. Helmholtz postuló que la energía se transforma de una forma a otra en lugar de crearse o destruirse, como se afirma:

Aunque Mayer y Joule establecieron la existencia de la energía como magnitud que se mantiene constante en los procesos, ninguno de ellos la formalizó

matemáticamente. Helmholtz (1821- 1894) llevó a cabo esa tarea y la presentó en la memoria *Über die Erhaltung der Kraft* (Sobre la conservación de la fuerza) (1847).

En ella se analiza el sistema conservativo (Solves & Tarin, 2008: p. 166).

Sentando las bases para entender la conversión de diferentes formas de energía. Poincaré investigó la relación entre la energía y el movimiento en el contexto de la teoría electromagnética de lo y demostró que la energía electromagnética puede contribuir a la masa de un sistema, estableciendo así una conexión entre energía y masa. Como es referido en:

J. H. Poincaré (1854-1912) señaló en 1900 que la energía electromagnética posee una densidad de masa que es igual a la densidad de energía dividida por el cuadrado de la velocidad de la luz (Solves & Tarin, 2008: p. 174).

Hasta este punto hemos visto los hechos históricos pero ¿porque el segundo postulado de la TER haría que Einstein pensara en términos de equivalencia?. Esto se debió a que este postulado establece que la velocidad de la luz en el vacío es constante e invariable para cualquier observador, independientemente de su movimiento relativo. Esto implica un desafío a la noción clásica, ya que en esta concepción la velocidad de la luz se consideraba dependiente del movimiento relativo y de la fuente emisora y el observador. Es decir, en la física clásica se pensaba que la velocidad de la luz variaba dependiendo del medio en el que se propagara.

Se creía que la luz se propagaba más lentamente en medios como el agua o el vidrio en comparación con el vacío. Por lo tanto, la velocidad de la luz en la física clásica no se consideraba simplemente una propiedad inherente al vacío, sino que dependía del medio en el que se encontrara. Para la física clásica implicaría que la velocidad de la luz podía variar

dependiendo del medio en el que se encuentre. Un ejemplo de las implicaciones del entendimiento clásico sería que la luz se desaceleraría al pasar a través de algún material como lo podría ser algún tipo de vidrio o el agua, esto en comparación con su velocidad en el vacío, al pasar por un medio sería menor.

Este entendimiento para permitía explicar la interacción entre la luz y los átomos del material a través del cual se estaba propagando. En este contexto la velocidad de la luz se entendía como una velocidad que era relativa al medio. Todo esto implicaría que la velocidad de la luz se sumaría o restaría a la velocidad de la fuente y del observador según sus movimientos relativos, lo cual daría paso a los resultados obtenidos en los experimentos ya mencionados de Michelson-Morley, que si bien no intentaba demostrar este cambio en la velocidad de la luz, si dio con resultados que implicarían contradicciones con la física clásica.

Al trabajar con las implicaciones del segundo postulado de la TER, Einstein se daría cuenta de que si bien la velocidad de la luz era constante, entonces el tiempo y el espacio debían ser relativos y debían estar interconectados. Pero que llevaba a que el espacio- tiempo fueran relativos debido a la constancia de la velocidad luz, esto se debía a que esta constancia tiene implicaciones fundamentales para dichos fenómenos. En primer lugar, las medidas de tiempo y espacio no son absolutas, sino que dependen del observador y del movimiento relativo entre los observadores. La velocidad de la luz se convertiría entonces en la velocidad límite a la cual la información o cualquier otra partícula puede moverse a través del espacio-tiempo, esto implica que para un objeto que se mueva a velocidades cercanas a la velocidad de la luz, el tiempo y el espacio se distorsionen en relación con un observador en reposo. Dando paso a los fenómenos llamados: dilatación del tiempo y contracción de la longitud.

La cantidad de energía,  $E$ , de un objeto es proporcional a un cambio en su masa,  $m$ . Lo cual Einstein demostró en su artículo de tres páginas, demostró que esa constante de proporcionalidad es el cuadrado de la velocidad de la luz en el vacío,  $c^2$ .

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 \quad (1.3)$$

Al observar dicha ecuación podemos decir que la masa y la energía dependen entre sí o que son mutuamente transformables, semejante a decir que una partícula de polvo contiene cierto grado de energía. Aun así cabe mencionar lo expresado por Orantes:

La energía y masa son dos características físicas de las partículas, distintas una de otra, y la ley de equivalencia establece únicamente la proporcionalidad entre ambas. La relación mutua entre masa y energía es análoga a la que existe entre las masas gravitatoria e inerte en mecánica clásica: las dos están indisolublemente vinculadas entre sí y son proporcionales, pero constituyen a la vez características distintas (Orantes, 1980: p. 11).

Es importante mencionar que si bien la teoría de la relatividad de Einstein establece una relación entre la masa y la energía, existen opiniones divergentes y enfoques alternativos en el debate sobre si estas entidades son estrictamente separadas o si están intrínsecamente relacionadas en el marco de la equivalencia masa-energía.

Los objetos tienen masa, y la masa contiene mucha energía en diferentes formas. Según la fórmula de Einstein, la materia es una manifestación de la energía. Veamos qué significa cada componente de esta fórmula por separado, también mencionar que la ecuación completa es de la siguiente forma  $E = \gamma mc^2$

$E$  la energía total del objeto en movimiento. En la relatividad, esta energía incluye tanto la energía en reposo del objeto (energía de masa) como la energía cinética de su movimiento. Se establece que la presencia de masa y energía tiene un impacto en la geometría del espacio-tiempo. Esto a su vez determina el movimiento de los objetos y cómo se relacionan gravitacionalmente, cabe resaltar que esta última explicación está relacionada la relatividad general.

$\gamma$  el componente menos conocido de la ecuación que es llamado factor de Lorentz. Este factor representado por la letra  $\gamma$ , es una cantidad que depende de la velocidad relativa entre el objeto y el observador. Está relacionado con la dilatación del tiempo y la contracción de la longitud en la teoría de la relatividad. Se define como  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ , donde  $v$  es la velocidad del objeto y  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío. El factor de Lorentz sirve para que la energía cinética relativista aumente a medida que la velocidad del objeto se acerca a la velocidad de la luz. Este componente de la ecuación no se suele tener en cuenta o no es visto debido a que cuando se trabaja con objetos en reposo o con velocidades bastantes menores que la velocidad de la luz, el factor de Lorentz se aproxima a 1 y es considerándose insignificante en comparación con la masa en reposo, dado estos casos la ecuación se simplifica y queda de la manera habitual por la cual es más conocida, omitiendo de esta manera el factor de Lorentz. Sin embargo, cuando las velocidades son significativas se deben tener en cuenta los efectos relativistas, para estos casos es necesario incluir el factor de Lorentz en la ecuación para obtener una descripción precisa.

$m$  es la masa que se tiene cuando está en reposo relativo, es decir, cuando no se mueve respecto a un observador. Es de mencionar que en relatividad general, la masa de un objeto

en movimiento se distingue en dos tipos: masa gravitacional y masa inercial. La masa gravitacional mide la interacción de un objeto con el campo gravitatorio, que depende de la curvatura del espacio-tiempo. Cuanto mayor sea la masa gravitacional de un objeto, mayor será la fuerza gravitatoria que siente. La masa inercial mide la resistencia de un objeto a cambiar su estado de movimiento cuando se le aplica una fuerza. Cuanto mayor sea la masa inercial de un objeto, mayor será la fuerza necesaria para acelerarlo o frenarlo.

$c$  es la velocidad de la luz en el vacío, que es una constante fundamental en la teoría de la relatividad. La velocidad de la luz es una cantidad extremadamente grande y es la velocidad límite que puede alcanzar cualquier objeto con masa. A su vez es siempre la misma para cualquier observador, independientemente de su movimiento relativo. Esto implica que la luz se propaga a la máxima velocidad posible y establece un límite para la velocidad de cualquier objeto en el universo. Ahora bien en la ecuación  $E = mc^2$   $c$  está elevado al cuadrado esto es para relacionar la energía y la masa de manera proporcional. Las implicaciones físicas de tener  $c$  elevado al cuadrado son significativas. Nos indica que la cantidad de energía contenida en una masa determinada es enorme, ya que la velocidad de la luz al cuadrado es un valor extremadamente grande. Significa que incluso una pequeña cantidad de masa puede contener una gran cantidad de energía. Implica que la materia no es simplemente sólida o inerte. Además, esta ecuación ha llevado a reflexiones filosóficas sobre la naturaleza de la realidad, el significado del tiempo y el espacio, y la comprensión de la materia y la energía como manifestaciones de una entidad más fundamental.

Para llegar a la ecuación  $E = mc^2$  Einstein relacionó conceptos de la física clásica y la TER. Parfraseando, usando la mecánica clásica y el momento de la radiación, se deduce que la luz de energía  $E$  le ha dado una masa  $m = \frac{E}{c^2}$  (Solves & Tarin, 2008). Uno de estos conceptos

es el que indica que la energía se conserva y se puede transformar. Otro es que la masa de un objeto aumenta con su velocidad y se hace infinita al llegar a la velocidad de la luz. Un tercero es que la energía y el momento de un objeto están relacionados. Un cuarto concepto, que fue clave para la deducción de Einstein, es que la luz tiene energía y momento, y que se propaga en el vacío con una velocidad constante  $c$ , independiente de la fuente o el observador. Este concepto se basa en las ecuaciones de Maxwell, que describen el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos, y que predicen la existencia de las ondas electromagnéticas, como la luz. Las ecuaciones de Maxwell también implican que la luz no tiene masa, ya que de lo contrario no podría alcanzar la velocidad  $c$ . Como es mencionado por Sorbes y Tarín:

En 1906 Einstein dedujo, de dos formas diferentes, una relación entre la energía y la masa. De acuerdo con uno de los procedimientos se obtiene el resultado  $E = mc^2$ . Para ello, se utilizan las ecuaciones de Maxwell del campo electromagnético y se hace uso de una aproximación hasta el término  $\frac{v}{c}$ . (Solves & Tarin, 2008, p. 175).

La ecuación de la equivalencia masa-energía se puede deducir matemáticamente a partir de las transformaciones de Lorentz, que describen cómo se transforman las magnitudes físicas cuando se cambia de un sistema de referencia a otro que se mueve a una velocidad constante (La ampliación se encuentran en el anexo No.1).

La ecuación indica que una pequeña cantidad de masa puede contener una gran cantidad de energía. Por ejemplo, en procesos nucleares como la fisión nuclear, una pequeña cantidad de masa se convierte en una gran cantidad de energía, como las encontradas en el interior del Sol. Esta conversión implica la transformación de la masa en diferentes formas de energía, como la energía térmica, energía radiante o la energía potencial. Este concepto se contrapone a la intuición clásica de que la masa es indestructible, según esta concepción, la masa de un

objeto es constante y no puede ser creada ni destruida. Esta idea se basaba en la noción intuitiva de que la masa era una propiedad fundamental de la materia y no puede cambiar. En la teoría de la relatividad la masa no es una cantidad fija e inmutable, sino como ya se ha mencionado anteriormente esta depende de la velocidad del objeto observado. A medida que la velocidad de un objeto se acerca a la velocidad de la luz, su masa aparente aumenta.

La equivalencia es una teoría moderna que supera los límites de la física clásica. Por lo tanto, no se aplica a las situaciones cotidianas, donde la masa y la energía se conservan por separado. Cuando se dice que la masa es una forma de energía, se refiere a que la masa tiene una cantidad de energía intrínseca asociada a ella de acuerdo con la ecuación. Sin embargo, la energía en sí misma es un concepto más amplio que abarca diversas formas, como la energía cinética, la energía potencial, la energía térmica, etc.

El concepto de equivalencia entre masa y energía es muy importante en la ciencia actual, ya que ha permitido explicar fenómenos físicos que no se podían entender con la física clásica. Por ejemplo, la ecuación  $E = mc^2$  explica cómo se libera una gran cantidad de energía en las reacciones nucleares, tanto en las centrales nucleares como en las bombas atómicas. También explica cómo se crean y se destruyen partículas subatómicas en los aceleradores de partículas, como el Gran Colisionador de Hadrones. Estos avances científicos han tenido un gran impacto en la sociedad, tanto en el ámbito tecnológico como en el ético. Por un lado, han permitido desarrollar nuevas fuentes de energía y de conocimiento, pero por otro lado, también han planteado nuevos riesgos y desafíos, como la contaminación nuclear, el armamento nuclear o la responsabilidad social de la ciencia.

## CAPITULO 3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

### **Metodología**

Los aspectos metodológicos en los cuales se enmarca el presente trabajo tienen en cuenta un enfoque conceptual e histórico llevado a cabo en tres capítulos, el primero siendo la problemática y objetivos, segundo el desarrollo conceptual que abarca las temáticas referentes al eje principal que es la equivalencia masa-energía. Por último, el tercer capítulo que abarca el desarrollo de la propuesta de aula que a su vez se divide en tres momentos, constando de una profundización histórica de aspectos de la TER y la equivalencia de masa y energía, de manera que se ahonda en la formulación y desarrollo de esta teoría. Para el desarrollo de una propuesta de aula que le permita al estudiante de grado undécimo, poder conceptualizar de forma más completa la TER y la equivalencia entre masa y energía.

### **Población**

La propuesta de aula ha sido elaborada con el propósito de ser utilizada para estudiantes que se están adentrando en conceptos de la física moderna. Está dirigida a estudiantes de educación media que se encuentran en grado undécimo, considerando que en este nivel se abordan algunos aspectos de la física moderna. La intención de esta propuesta de aula es proporcionar a los estudiantes una introducción sólida al concepto de equivalencia masa-energía pasando por aspectos de la TER. Teniendo en cuenta los conocimientos previos adquiridos en cursos anteriores de física clásica, se busca fomentar una comprensión más completa de la física moderna.

## **Propuesta de Aula**

La propuesta de aula se estructura en tres momentos con el objetivo de aproximar a los estudiantes de grado undécimo a conceptos de la TER, culminando con la comprensión de la equivalencia masa-energía. Cada momento incluirá actividades diseñadas a partir de lecturas de autoría propia, basadas en el capítulo 2 del presente trabajo, con el fin de presentar a los estudiantes dichos conceptos relativistas. Se sugiere que los estudiantes realicen las actividades en parejas, de modo que puedan discutir los resultados a medida que se avanza en las actividades. Al finalizar cada momento, el docente llevará a cabo una socialización con toda la clase para compartir los resultados propuestos por cada pareja de estudiantes. Este enfoque fomentará la apropiación de las nuevas ideas, ya sea a través de debates sobre la validez de los resultados (Los momentos se encuentran en el anexo No.3)

### **Momento 1:**

En este momento el objetivo es introducir a los estudiantes en los conceptos fundamentales de la TER y la relación entre masa y energía.

Primera actividad, presentación del tema y repaso de conceptos clave: En esta actividad, se realizará una breve explicación sobre la teoría de la TER y su importancia en la física moderna. Se repasarán los conceptos de espacio-tiempo, dilatación temporal y contracción espacial para sentar las bases del tema.

Segunda actividad, introducción a conceptos previos de equivalencia masa-energía: En esta actividad, se introducirán los conceptos fundamentales que son necesarios para comprender la equivalencia masa-energía. Se realizará una comparación entre los conceptos de masa, fuerza y energía en la teoría clásica y en la TER.

Tercera actividad, discusión sobre los temas tratados en el momento: En esta última actividad, se llevará a cabo una discusión sobre los conceptos vistos de la TER, centrando la discusión en cómo la TER desafía varias nociones de la teoría clásica. Se abordará un poco cómo la ecuación  $E=mc^2$  muestra que la masa puede convertirse en energía y viceversa.

El momento se organiza en torno a tres actividades: presentación y repaso de conceptos clave, introducción al concepto de la TER y discusión sobre conceptos previos a la equivalencia masa-energía. Estas actividades permitirán a los estudiantes comprender los fundamentos de la TER y la relación entre masa y energía en el contexto de la física moderna permitiendo comparar los conceptos clásicos con los relativistas como se observó en cada apartado del capítulo 2.

### **Momento 2:**

Para este momento el objetivo es profundizar en el desarrollo conceptual y las aplicaciones de la equivalencia masa-energía, centrándose en la ecuación  $E = mc^2$ .

Primera actividad, explicación detallada de la ecuación  $E = mc^2$ : En esta actividad, se proporcionará una explicación a detalle de la ecuación, desglosando cada componente y su significado como se describió en el apartado de equivalencia masa-energía. Se analizará el papel de la masa y la velocidad de la luz al cuadrado en la relación entre masa y energía.

Segunda actividad, ejemplos numéricos para ilustrar la relación entre masa y energía: En esta actividad, se presentarán ejemplos numéricos que permitan a los estudiantes comprender cómo la masa y la energía están relacionadas según la ecuación  $E = mc^2$ . Se realizarán cálculos sencillos para mostrar cómo un cambio en la masa se traduce en un cambio correspondiente en la energía.

El segundo momento se estructura en torno a dos actividades: explicación detallada de la ecuación  $E = mc^2$ , ejemplos numéricos para ilustrar la relación entre masa y energía, y exploración de las aplicaciones prácticas de la equivalencia masa-energía. Estas actividades permitirán a los estudiantes desarrollar un conocimiento más detallado sobre el tema y comprender las implicaciones de esta relación en el mundo actual.

### **Momento 3:**

El objetivo para este momento es realizar una reflexión y conclusión sobre la equivalencia masa-energía, debatir sobre sus implicaciones y consecuencias, y repasar los conceptos clave y aplicaciones de esta relación.

En esta actividad, los estudiantes participarán en la lectura final sobre la relación masa-energía. A continuación, responderán preguntas de opción múltiple que enfatizan en el concepto de masa tanto en física clásica como relativista, tendrán la oportunidad de dar respuestas abiertas basadas en el texto.

Segunda actividad, solución de problema teórico sobre equivalencia masa-energía: Los estudiantes tendrán tiempo para realizar en las parejas ya establecidas sobre el problema propuesto. Podrán apoyarse en sus apuntes de los momentos pasados y de los ejemplos vistos anteriormente. El docente facilitará orientación cuando sea necesario.

Conclusión y resumen final: En esta actividad, un debate final sobre la equivalencia masa-energía. El docente destacará la importancia de la TER y su impacto en nuestra comprensión del universo. Se reforzará la relevancia y el interés continuo de la temática, animando a los estudiantes a seguir explorando y profundizando en este campo de estudio.

Cierre de la propuesta de aula, el docente utilizará diferentes estrategias de evaluación, teniendo como base los ejercicios realizados en los momentos y la participación en los debates en grupo, para evaluar el nivel de conocimiento adquirido. Finalmente, se cerrará la propuesta de aula resaltando la relevancia del tema y el interés continuo que puede despertar en los estudiantes. Esta estructura del momento proporciona un enfoque reflexivo y participativo, promoviendo la discusión, el debate y la consolidación de los conceptos clave de la equivalencia masa-energía. Además, se destaca la importancia de la TER y su relación con esta temática.

### **Conclusiones**

El estudio de la información consultada sobre la equivalencia masa-energía en la teoría de la relatividad permitió establecer una ruta para su enseñanza. Se han identificado los elementos conceptuales esenciales, los cuales parten del origen de la TER, pasando por conceptos relevantes como espacio-tiempo, fuerza, energía y un componente filosófico como la causalidad, llegando así al concepto de equivalencia masa-energía. Estos elementos resultaron pertinentes para una mejor comprensión del tema central, que es la equivalencia masa-energía.

Con el fin de acercar a los estudiantes de grado undécimo a los conceptos de equivalencia de masa y energía en la teoría de la relatividad, se ha diseñado una propuesta de aula que parte de los criterios establecidos temáticamente y de la experiencia previa de los estudiantes en el campo de la física clásica. Esta propuesta se apoya en enfoques conceptuales que facilitan el entendimiento de la TER y la equivalencia a partir de nociones clave de dichos conceptos, para que los estudiantes tengan una asimilación progresiva a estas temáticas más complejas.

Por último en la enseñanza de la equivalencia masa-energía desde la teoría de la relatividad, es crucial tener en cuenta las bases conceptuales de esta teoría, como los planteamientos propuestos por Einstein. Además, es importante resaltar las problemáticas físicas asociadas al principio de causalidad que dieron origen a esta teoría, y contrastar las diferencias entre la física clásica y la física moderna. En este contexto, es apropiado proporcionar a los estudiantes herramientas para una comprensión profunda de los conceptos fundamentales de la TER que conducen al concepto de equivalencia masa-energía. Esto implica explorar los postulados de Einstein, como la invariancia de las leyes físicas y la constancia de la velocidad de la luz, que forman la base de la equivalencia masa-energía.

Además, resulta necesario abordar las problemáticas que surgieron en la física clásica y que condujeron a la necesidad de una nueva teoría, tales como las inconsistencias observadas en las leyes de la mecánica newtoniana a altas velocidades y las contradicciones entre la mecánica clásica y la electromagnética.

En este contexto, la enseñanza de la equivalencia masa-energía no se limita únicamente a la presentación de la ecuación  $E = mc^2$ , sino que implica también proporcionar un marco conceptual sólido que facilite la comprensión de las implicaciones físicas y conceptuales de esta relación. Esto implica reflexionar sobre la causalidad y cómo la teoría de la relatividad introduce nuevas perspectivas en nuestra comprensión del universo.

### Referencias Bibliográficas

Acosta, L. T. (2017). Diseño de una secuencia didáctica para introducir algunos conceptos fundamentales de la relatividad especial a partir del análisis de la geometría de Minkowski.

Alemañ, R., & Perez, J. (2001). UNA NUEVA PROPUESTA DIDÁCTICA PARA LA ENSEÑANZA DE LA RELATIVIDAD EN EL BACHILLERATO.

Alonso, M., & Soler, V. (2006). LA RELATIVIDAD EN EL BACHILLERATO. UNA PROPUESTA DE UNIDAD DIDÁCTICA. Enseñanza de las ciencias, 439-454.

Arriasecq, I., & Greca, I. M. (2002). Algunas consideraciones históricas, epistemológicas y didácticas para el abordaje de la teoría de la relatividad especial en el nivel medio y polimodal.

B.Janssen (2005). Breve repaso de la Relatividad Especial. Universidad de Granada.

Díaz, L. (2011). El experimento de Michelson y Morley: una propuesta didáctica para la enseñanza de la relatividad especial. Revista Científica, 13(1), 127-132.

Einstein, A. (1907). Sobre el principio de la relatividad y las conclusiones extraídas de él. Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik, 4, 411-462.

Einstein, A. (1905). Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento. Anales de Física, 17(10), 891-921.

Einstein, A. (1905). ¿Depende la inercia de un cuerpo de su contenido de energía? (pp. 121-124) Annalen der Physik,

Guayara, D. S. (2017). La enseñanza de la teoría especial de la Relatividad: reglas fijas y relojes con estudiantes de grado séptimo.

- Grajales, H. (2017). La enseñanza de la Física Moderna en la educación básica: una aproximación desde el principio de incertidumbre.
- Greene, B. (2004). *The fabric of the cosmos: Space, time, and the texture of reality*. Knopf Doubleday Publishing Group.
- Hume, D. (1992). *Tratado de la naturaleza humana* (1992), Tomo I. México: Gernika.
- Impey, C. (2012). *How It Began: A Time-Traveler's Guide to the Universe*.
- López Posada, Y. C., & Urrego, V. A. (2012). Problemáticas en el proceso de enseñanza y aprendizaje de la teoría especial de la relatividad con respecto a los maestros en formación de la licenciatura en matemáticas y física de la Universidad de Antioquia.
- Martínez Muñoz, J. C. (2011). Propuesta didáctica para la enseñanza del concepto de masa en los estudiantes del grado décimo de la Institución Educativa Raíces del Futuro. *Facultad de Ciencias*.
- Ministerio de Educación Nacional. (28 de 12 de 2006). Estandares básicos de competencias en ciencias sociales y ciencias naturales.
- Nieto Camesella, D. (2021). *Mente y Mundo: aportaciones de Ernst Mach a la teoría de la Mente Extendida*.
- Niño, V. (2001). El tiempo en la mecánica de Newton, la relatividad especial y la mecánica cuántica. *Revista Colombiana de Filosofía de la ciencia*, 2(5), 25-34.
- Orantes de la Fuente, J. L. (1980). Masa y energía dentro de la teoría de la relatividad. *Revista de bachillerato*.

Ostermann, F., & Moreira, M. (2000). Física contemporánea en la escuela secundaria: una experiencia en el aula involucrando formación de profesores. *Enseñanza de las ciencias*, 391 - 404.

Sanchez, M. (2021) Aproximación a la Teoría Especial de la Relatividad a Partir de las Nociones de Espacio y Tiempo a Estudiantes de Grado Undécimo. Universidad. Pedagógica Nacional.

Solbes, J., & Tarín, F. (2008). Generalizando el concepto de energía y su conservación. *Didáctica de las ciencias experimentales y sociales*.

Suau, B. C. (2012). Geometría y método en diseño gráfico: del paradigma Newtoniano a la Teoría General de Sistemas, el Caos y los Fractales. *Arte, Individuo y Sociedad*, 24(2), 269-282.

Terceiro Lomba, J. (2015). Causalidad en Ciencias Sociales. In *Anales de la Real Academia de Ciencias Morales y Políticas* (pp. 187-206). Ministerio de Justicia.

Valencia Plazas, A. L. (2019). La extinción y el persistente renacimiento de las teorías del Éter.

## ANEXOS

### ANEXO No.1

#### Transformación de Lorentz

Como es brevemente mencionado en apartados anteriores, a comienzos del siglo XX debido a resultados de experimentos que buscaban determinar los efectos producidos por el movimiento de traslación de la tierra y la no covariancia de las ecuaciones de Maxwell ante las transformaciones galileanas, dando resultados nulos, llevando a los físicos de esta época a sugerir la necesidad de una transformación radical de los conceptos que fundamentaban la teoría electromagnética. Para dicha labor se podrían plantear dos maneras las cuales serían: remplazar el sistema de ecuaciones de transformación de Galileo por otro, en el cual las ecuaciones fuesen covariantes y la velocidad de la luz fuera la misma en todos los marcos inerciales o modificar las ecuaciones de Maxwell para que fueran covariantes ante las transformaciones de Galileo. Lorentz fue el primero que descubrió las transformaciones adecuadas, primeramente para resolver inconsistencias entre el electromagnetismo y la mecánica clásica, Lorentz asumió que la velocidad invariante para ondas electromagnéticas era dada por un sistema de referencia privilegiado, dicha idea relacionada con la hipótesis del éter, pero no percatándose que éstas contenían un cambio trascendental en las concepciones de tiempo y espacio que había hasta ese momento.

De las dos opciones mencionadas anteriormente Einstein eligió la opción de remplazar el sistema de ecuaciones por otras.

Para 1904 ya se conocía con anterioridad que la ecuación de propagación de las ondas electromagnéticas no era invariante frente a la transformación de Galileo, esto supone que las leyes de la física son igualmente validas en cualquier sistema de referencia inercial desde

el cual sea observado. La ley de propagación de la luz es distinta según el sistema de referencia. Lorentz introdujo una nueva transformación para evitar dicha dificultad, esta transformación se muestra de la siguiente manera:

$$x'_1 = x_1$$

$$x'_2 = x_2$$

$$x'_3 = \frac{x_3 + i\beta x_4}{\sqrt{1 - \beta^2}} \qquad x'_3 = \frac{x_3 + vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$x'_4 = \frac{x_4 + i\beta x_3}{\sqrt{1 - \beta^2}} \qquad t' = \frac{t - \frac{\beta}{c} \cdot x_3}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$\beta = \frac{v}{c}$$

De estas se pueden deducir que el tiempo ya no es más una magnitud absoluta para cualquier fenómeno, si no que está relacionado al sistema de referencia que se tome para dicho fenómeno; las distancias espaciales dejan de ser absolutas, sino que también dependen del sistema en que se encuentren y por último que el universo no es más tridimensional ya que se convierte en tetradimensional, en la cual la cuarta coordenada está relacionada al tiempo.

$$x^l = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad x = \frac{x^l + vt^l}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y^l = y \qquad y = y^l$$

$$z^l = z \qquad z = z^l$$

$$t^l = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad t = \frac{t^l + \frac{v}{c^2}x^l}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Ya habiendo visto las transformaciones de Lorentz de manera general ahora es pertinente ver cuáles de estas están en relación con la equivalencia masa energía. Las transformaciones de Lorentz que se relacionan directamente con la equivalencia son las transformaciones de longitud y tiempo. Estas dos transformaciones son necesarias para preservar la invariancia de la velocidad de la luz para todos los observadores, independientemente del sistema de referencia en el que se realicen las mediciones. Dichas transformaciones están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$x^l = \gamma(x - vt)$$

$$t^l = \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right)$$

Donde:  $x'$  y  $t'$  son las coordenadas espaciales y temporales en el sistema en movimiento,  $x$  y  $t$  son las coordenadas espaciales y temporales en el sistema en reposo,  $v$  es la velocidad relativa entre los dos sistemas,  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío, y  $\gamma$  es el factor de Lorentz, definido de la siguiente manera:

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

La implicación de estas transformaciones es que las longitudes y los intervalos de tiempo se dilatan en el sistema en movimiento en comparación con el sistema en reposo. En el caso del factor  $\gamma$  también aparece en la relación entre la energía y la masa.

La conexión matemática entre las transformaciones de Lorentz y la equivalencia deriva de la conservación del cuadrimomento en la TER. La componente temporal del cuadrimomento es la energía y las componentes espaciales están relacionadas al momento lineal. Al aplicar las transformaciones de Lorentz, se preserva la magnitud del cuadrimomento, lo que implica la equivalencia entre masa y energía.

El cuadrimomento es un concepto relevante debido a que combina la energía y el momento lineal en un único objeto matemático de cuatro componentes. Es utilizado para describir las propiedades cinéticas de una partícula en el espacio-tiempo de cuatro dimensiones. Representado como un cuadri-vector con los respectivos cuatro componentes, siendo  $P$ , el cuadrimomento que se compone de la energía y el momento lineal de la partícula en tres dimensiones espaciales y una dimensión adicional que es la temporal. Matemáticamente, se define de la siguiente manera:

$$P = \frac{E}{c} - p$$

Siendo  $E$  la energía de la partícula,  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío, y  $p$  es el momento lineal de la partícula en tres dimensiones espaciales. La magnitud del cuadrimomento, conservada en cualquier transformación, se define como:

$$P^2 = \left(\frac{E}{c}\right)^2 - p^2$$

Siendo  $P^2$  el cuadrado del cuadrimomento. El cuadrimomento es un concepto importante en la relatividad, debido a que se conserva en las transformaciones entre diferentes sistemas inerciales y es una cantidad invariante en todos los marcos de referencia inerciales. Permite describir coherentemente la energía y el momento en el contexto relativista, y está

estrechamente relacionado con la equivalencia masa-energía y las transformaciones de Lorentz.

## **ANEXO No.2**

### **Postulados de la TER**

Toda la relatividad especial se basa en dos postulados:

1. Las leyes de acuerdo a las cuales cambian los estados de los sistemas físicos no dependen de si estos cambios de estado se refieren a uno u otro de dos sistemas de coordenadas que se encuentran en movimiento relativo de traslación uniforme (Einstein, 1905, p.4)

Todas las leyes de la física son válidas para todos los sistemas inerciales. Este postulado fue formulado por Einstein y amplía el principio de relatividad propuesto por Galileo en el siglo XVII. Establece que no hay experimento físico que permita distinguir si un observador está en reposo o en movimiento rectilíneo uniforme. Dos observadores en movimiento relativo constante respecto al otro percibirán las mismas leyes físicas, y por lo tanto, las ecuaciones de la física deben ser formuladas de manera que sean consistentes en diferentes sistemas de referencia.

2. “Cualquier rayo de luz se propaga en un sistema de coordenadas en “reposo” con cierta velocidad  $V$ , independientemente de si este rayo de luz ha sido emitido por un cuerpo en reposo o en movimiento” (Einstein, 1905, p.4). La velocidad de la luz en el vacío es una constante universal e invariable para todos los observadores, independientemente del estado de movimiento de la fuente. Experimentalmente, este postulado fue corroborado por el famoso experimento de Michelson y Morley, el cual

buscaba detectar el éter luminífero como medio de propagación de la luz. Sin embargo, el experimento no encontró evidencia de la existencia del éter y confirmó la constancia de la velocidad de la luz.

El primer postulado de la relatividad especial, que establece la invariancia de las leyes de la física en todos los sistemas inerciales, fue formulado por Einstein en el año 1905. Einstein amplió este postulado para abarcar todas las leyes físicas, incluyendo el electromagnetismo, que se comporta de manera distinta a la mecánica newtoniana. La teoría desarrollada por Maxwell describía correctamente el electromagnetismo y era consistente con la mecánica newtoniana. En este primer postulado de la relatividad especial, se afirma que no hay ningún experimento físico capaz de distinguir si un observador está en reposo o en movimiento rectilíneo uniforme. Dos observadores en movimiento relativo constante entre sí perciben las mismas leyes de la física. Por lo tanto, las ecuaciones de la física deben ser formuladas de manera que sean consistentes en diferentes sistemas de referencia. En este postulado afirma:

No existe ningún experimento físico que sea capaz de distinguir si un observador está en reposo o en movimiento uniforme rectilíneo. Dos observadores que se mueven uno con respecto al otro ven la misma física y, por lo tanto, las leyes de la física deben escribirse de modo que no cambien al pasar de un sistema de referencia a otro (Janssen, 2005: p. 2).

El segundo postulado se ve en la teoría de Maxwell ya que en esta se establece que las ondas electromagnéticas, incluyendo la luz, se propagan a una velocidad constante. Es ampliamente aceptado que todas las leyes de la física son válidas para cualquier observador, lo que significa que los resultados experimentales y las teorías deben ser consistentes en todos los sistemas de referencia. Se reconoce que la velocidad de la luz, denotada por "c", es una

constante universal en el vacío. Estos postulados, considerando sus implicaciones, llevan a abandonar las antiguas concepciones del espacio y el tiempo, y establecen las bases de la relatividad especial.

Profundizando en el primer postulado, la equivalencia de los observadores inerciales nos permite establecer la relación entre las mediciones realizadas por un observador y las realizadas por otro. En contraste con la Mecánica newtoniana, la cual utiliza las transformaciones de Galileo para relacionar dos sistemas de referencia inerciales, la relatividad especial introduce las transformaciones de Lorentz como la descripción más precisa de cómo se relacionan los observadores inerciales en presencia de velocidades cercanas a la velocidad de la luz. Estas transformaciones de Lorentz tienen en cuenta los efectos de dilatación del tiempo y contracción de la longitud, proporcionando una descripción más completa de los fenómenos físicos en el marco de la relatividad especial.

$$x' = x - vt \qquad y' = y \qquad z' = z \qquad t' = t \quad (1.1)$$

Las transformaciones mencionadas anteriormente (1.1) corresponden a las transformaciones de Galileo, que son válidas en el contexto de la mecánica newtoniana para relacionar las coordenadas espaciales y el tiempo entre dos sistemas de referencia inerciales en movimiento relativo constante. Sin embargo, estas transformaciones no son precisas a velocidades cercanas a la velocidad de la luz y no son utilizadas en la teoría de la relatividad especial. En la relatividad especial, se utilizan las transformaciones de Lorentz para relacionar las coordenadas y el tiempo entre dos sistemas de referencia inerciales en movimiento relativo constante. Estas transformaciones incluyen los efectos relativistas y son:

$$x^l = \gamma(x - vt) \qquad y^l = y \qquad z^l = z \qquad t^l = \gamma \left( t - \frac{vx}{c^2} \right) \quad (1.2)$$

Estas transformaciones no consideran el segundo postulado de la constancia de la velocidad de la luz como podemos ver en la suma clásica de velocidades que se derivan de estas

$$V = V' + v \quad (1.3)$$

La suma clásica de las velocidades (1.3) es incorrecta debido a que permitiría velocidades mayores las de la  $c$ .

**ANEXO No.3****PROPUESTA DE AULA****RECOMENDACIONES ANTES DE INICIAR ACTIVIDADES**

A continuación, se presenta un conjunto de momentos diseñados para enseñar conceptos de relatividad especial, centrándose en la equivalencia masa-energía y sus conceptos relacionados, como la energía en relatividad, la masa en relatividad y la velocidad de la luz. Todos los momentos están basados en lecturas de autoría propia que se encuentra en el capítulo 2 del presente trabajo.

Esta propuesta de aula tiene como finalidad brindar apoyo al docente, reconociendo su papel fundamental en la implementación y la importancia que tiene en el significado y trascendencia de las clases. Se proporciona una estructura para los momentos, siguiendo los objetivos establecidos para cada una. Cada momento puede tener un tiempo de duración que el docente considera mejor para llevar cada uno a cabo.

Se recomienda antes de llevar a cabo los tres momentos planificados realizar una clase introductoria en la cual se aborden los conceptos de masa, energía, fuerza, espacio y tiempo en la teoría clásica. Esta explicación puede ser mencionar las definiciones de cada concepto para la teoría clásica. Esto con el fin de que llevar a cabo la propuesta de aula se pueda comparar y contrastar la concepción clásica con la relatividad especial, los estudiantes podrán apreciar las diferencias y los avances significativos que la teoría de la relatividad ha aportado a nuestra comprensión del universo. También resaltar que al finalizar en algunos momentos habrá un momento de discusión, al momento de evaluar la actividad tener en cuenta la participación que hubo en este espacio.

## MOMENTO 1

### Explorando la Relatividad Especial: Conceptos Fundamentales de la TER

**OBJETIVO:** Introducir a los estudiantes en los conceptos fundamentales de la relatividad especial y la relación entre masa y energía



Tenga en cuenta el siguiente texto para el desarrollo de las actividades.

### SOBRE LA TER

"El siguiente texto es de autoría propia".

En nuestras experiencias y observaciones diarias, a menudo apreciamos objetos que se desplazan a velocidades significativamente más bajas en comparación con la velocidad de la luz. La mecánica de Newton fue desarrollada para describir el movimiento de estos objetos y es adecuada para explicar una amplia gama de fenómenos visibles al ojo humano. Sin embargo, esta teoría no es capaz de describir de manera adecuada el movimiento de objetos que se acercan a la velocidad de la luz. En respuesta a este tipo de problemas, Einstein ideó un experimento mental conocido como el "pensamiento del observador en movimiento". Este experimento mental plantea la pregunta de qué sucedería si una persona viajara a la par de un rayo de luz y pudiera ver el rayo y su entorno. Según la Teoría de la Relatividad Especial (TER), se postula que la velocidad de la luz en el vacío es constante para cualquier observador. Por lo tanto, en el escenario planteado por el experimento, la luz no parecería moverse en relación al observador, sino que se vería que permanecería estática.

Un experimento mental como este ayudaría a Einstein a comprender implicaciones de la relatividad especial en cuanto al tiempo y el espacio se ven afectados por la velocidad de la luz. Dicho experimento sería pensado en 1905 el mismo año que desarrollaría la TER.

Volviendo a la teórica clásica desde el punto de vista experimental, podemos poner a prueba las predicciones de la teoría de Newton utilizando velocidades altas como lo podría hacer acelerando una partícula cargada, por ejemplo un electrón a través de grandes diferencias de potencial eléctrico. Si aplicamos una diferencia de potencial de varios millones de voltios, es posible acelerar un electrón hasta una velocidad de  $0.99c$  (donde  $c$  es la velocidad de la luz). Según la mecánica de newtoniana, si se aumenta la diferencia de potencial, la energía cinética del electrón debería ser cuatro veces mayor y su velocidad se duplicaría, es decir, quedaría a  $1.98c$ . Experimentos posteriores han comprobado que la

velocidad del electrón, al igual que la velocidad de cualquier otro cuerpo en el Universo, siempre es menor que la velocidad de la luz, sin importar la magnitud del voltaje acelerador. Ya que la mecánica de Newton no supone un límite superior para la velocidad, no concuerda con los resultados experimentales modernos y es claramente una teoría limitada para explicar varios fenómenos.

Como se mencionó anteriormente, en 1905, Einstein publicó su teoría especial de la relatividad a la edad de tan solo 26 años. Durante ese tiempo, también se encontraba investigando y desarrollando el campo del electromagnetismo. Cabe resaltar la confianza que Einstein tenía en la teoría electromagnética y en la validez de las ecuaciones de Maxwell. Sin embargo, para lograr una armonía entre estas ecuaciones y uno de sus propios postulados, Einstein se vio en la necesidad de adoptar una idea revolucionaria: suponer que el espacio y el tiempo no eran absolutos.

En este punto es relevante observar las diferencias que hay entre la teoría clásica y la TER. Para la teoría clásica, el espacio y el tiempo son entidades separadas e independientes. El espacio se pensaba como una dimensión tridimensional absoluta las cuales son la altura, anchura y profundidad. Estas dimensiones forman parte del sistema de coordenadas cartesianas en el cual los objetos se pueden ubicar y ser medidos en términos de su posición en cada una de estas dimensiones. Estas tres dimensiones son también conocidas como los ejes  $x$ ,  $y$ , y  $z$ , aunque en la mayoría de los ejercicios en clase se opte por situaciones en las dimensiones  $x$  y  $y$  para una mayor facilidad en los cálculos. El tiempo, por otro lado, se percibe como una magnitud universal y uniforme que transcurre de manera constante para todos los observadores, es decir, que para cualquier persona en cualquier parte el tiempo transcurre igual que para otra persona y otro lugar diferente. Estos conceptos clásicos eran adecuados para describir y predecir el movimiento de objetos a velocidades mucho menores que la de la luz.

La TER introdujo una nueva perspectiva diferente a la teoría clásica. Einstein propuso que el espacio y el tiempo están intrínsecamente relacionados, formando una entidad unificada llamada espacio-tiempo. Esto que las dimensiones espaciales utilizadas en la teoría clásica (altura, anchura y profundidad) habría que añadir una dimensión temporal (tiempo). En esta teoría de Einstein, el tiempo se trata como una dimensión adicional a las tres dimensiones espaciales. Por lo tanto, en la TER se trabaja con un marco de cuatro dimensiones en el cual para los eventos y las trayectorias de los objetos se describen mediante coordenadas espaciales y temporales.

Esta teoría desarrollada por Einstein traería otro concepto llamado dilatación temporal, la TER se plantea que el tiempo no es absoluto y puede variar según la velocidad relativa entre observadores. A altas velocidades, los relojes en movimiento parecen avanzar más lentamente en comparación con los relojes en reposo. Esta dilatación temporal ha sido confirmada experimentalmente en diversos experimentos, como los realizados con partículas aceleradas.

Según la TER, el tiempo es relativo y está relacionado con la velocidad relativa entre los observadores, es decir, cuando dos observadores están en movimiento

relativo y uno de ellos se acerca a velocidades cercanas a la velocidad de la luz, se experimentarán un fenómeno llamado dilatación temporal. En otras palabras, el reloj de una de las personas en movimiento parecerá avanzar más despacio en comparación con el reloj de la otra persona en reposo. Este fenómeno se produce debido a la interrelación en el concepto del espacio-tiempo. El movimiento a velocidades cercanas a la velocidad de la luz afecta la forma en que se mide el tiempo. A medida que un objeto se acerca a la velocidad de la luz, el tiempo se ralentiza para ese objeto en comparación con un observador en reposo relativo. En resumen, la velocidad influye en la medición del tiempo y provoca que este transcurra más lentamente a altas velocidades.

La contracción espacial es otro concepto de la TER el cual resulta llamativo. A velocidades cercanas a la de la luz, los objetos en movimiento se contraen en la dirección de su movimiento desde el punto de vista de un observador en reposo.

Esto ocurre de nuevo a la interrelación en la entidad llamada espacio-tiempo, y que, a medida que la velocidad de un objeto se acerca a la velocidad de la luz, la medición de la distancia en la dirección del movimiento se reduce. Esta contracción espacial solo se hace evidente a velocidades extremadamente altas, ya que a velocidades cotidianas (bastante bajas) las diferencias son prácticamente imperceptibles. Este fenómeno se conoce como contracción Lorentz en honor a Hendrik Lorentz, físico neerlandés que hizo importantes contribuciones a la TER, siendo uno de los primeros en describir matemáticamente los efectos de la velocidad relativa en el espacio y el tiempo. En sus estudios, Lorentz desarrolló las llamadas transformaciones de Lorentz, que son ecuaciones matemáticas que sirven para describir cómo las medidas de espacio y tiempo se ven afectadas por el movimiento relativo. Estas transformaciones permitieron predecir la contracción espacial.

### ACTIVIDAD 1

En base al texto responde las siguientes preguntas:

**1.** Según el texto, ¿cuál es una de las problemáticas de la mecánica de Newton cuando se acerca a la velocidad de la luz?

- a) No puede describir el movimiento de objetos en reposo.
- b) No puede explicar fenómenos visibles al ojo humano.
- c) No es capaz de describir el movimiento de objetos que se acercan a la velocidad de la luz.

**2.** ¿Qué experimento mental ayudó a Einstein a comprender las implicaciones de la relatividad especial?

- a) Experimento de la división de núcleos de átomos pesados.
- b) Experimento de aceleración de un electrón.
- c) Experimento del observador en movimiento junto a un haz de luz.

**3.** ¿Qué diferencia hay entre la teoría clásica y la teoría especial de la relatividad en cuanto al espacio y el tiempo?

a) En la teoría clásica, el espacio y el tiempo son absolutos, mientras que en la TER son entidades relacionadas.

b) En la teoría clásica, el espacio y el tiempo son entidades separadas, mientras que en la TER son absolutos.

c) En la teoría clásica, el espacio y el tiempo son entidades relacionadas, mientras que en la TER son separadas.

**4.** ¿Qué fenómeno se produce a altas velocidades según la TER?

a) Contracción temporal.

b) Dilatación temporal.

c) Contracción espacial.

**5.** ¿Cuál crees que fue la contribución más significativa de Albert Einstein a la física con el desarrollo de la teoría especial de la relatividad? Fundamenta tu respuesta con ejemplos o argumentos del texto.

---

---

---

---

---

---

---

---

**6.** Según tu comprensión del texto, ¿cómo crees que podrían aplicarse los conceptos de dilatación temporal y contracción espacial en el futuro? Proporciona ejemplos concretos y razona por qué crees que podrían ser relevantes en determinadas áreas o situaciones.

---

---

---

---

---

---

---

---

## ACTIVIDAD 2

### CONCEPTOS PREVIOS A LA EQUIVALENCIA MASA-ENERGIA

"El siguiente texto es de autoría propia".

En la teoría clásica, se concibe la masa de un objeto como la cantidad de materia que contiene. Es una medida de la resistencia al cambio de movimiento, lo que conocemos como inercia. Por otro lado, la fuerza se define como una acción capaz de alterar el estado de movimiento de un objeto. Según la segunda ley de Newton, la fuerza es igual al producto de la masa del objeto por su aceleración. En cuanto a la energía, en la teoría clásica se concibe como la capacidad de un sistema para llevar a cabo trabajo. Se manifiesta de diversas formas, como la energía cinética relacionada con el movimiento y la energía potencial asociada a la posición o configuración de un objeto.

En la física clásica, la energía se definía como la capacidad de un objeto para realizar trabajo, es decir, para cambiar la posición de un objeto. Se distinguían diferentes formas de energía, como la energía cinética, que se refiere a la energía asociada al movimiento de un objeto, y la energía potencial, que se relaciona con la posición de un objeto. Estos conceptos resultaban útiles para comprender y predecir el movimiento de los objetos en el espacio y el tiempo. Además, en la física clásica, la energía también se asociaba con la producción de calor y se conservaba en cualquier proceso físico. En la TER el concepto de energía difiere de la física clásica y representa una nueva comprensión. En la relatividad especial, la energía no se considera una propiedad de los objetos, sino una propiedad del espacio-tiempo en su conjunto, es decir, del sistema formado por el objeto y su entorno.

En lo que respecta a la fuerza, la teoría de la relatividad especial plantea que no es una entidad independiente, sino que surge de la interacción entre masa y energía. La presencia de masa y energía provoca la curvatura del espacio-tiempo, lo cual determina cómo los objetos se mueven en presencia de fuerzas gravitacionales. De esta manera, la fuerza se entiende como una manifestación de la curvatura del espacio-tiempo, resultado de la existencia de masa y energía.

En resumen, según la teoría clásica, la masa se define como la cantidad de materia, la fuerza como la acción que altera el estado de movimiento y la energía como la capacidad de realizar trabajo. En la teoría de la relatividad especial, la masa y la energía están íntimamente relacionadas mediante la ecuación  $E=mc^2$ , y la fuerza se interpreta como la manifestación de la curvatura del espacio-tiempo generada por la presencia de masa y energía. Estos conceptos han sido fundamentales para el progreso de la física y han abierto nuevas perspectivas en nuestra comprensión del universo.

### Ejercicio de comprensión:

a) Define brevemente qué es la masa en la teoría clásica y cómo se relaciona con la inercia de un cuerpo.

---



---



---



---

b) Explica cómo se define la fuerza en la teoría clásica y cuál es la relación entre masa y fuerza según la segunda ley de Newton.

---



---



---

c) Describe qué es la energía en la teoría clásica y menciona al menos dos formas en las que se puede manifestar.

---



---



---

### Ejercicios prácticos:

#### EJEMPLOS:

1. Al levantar un objeto a una altura de 9,0 metros se genera una energía potencial de 540,0 Joule. ¿Cuál es la masa de dicho objeto?

Datos:

$$h = 9,0m$$

$$E_p = 540,0j$$

$$g = 9,81m$$

$$m = ?$$

Formula de energía potencial

$$E_p = mgh$$

Despejado  $m$  de la ecuación

$$m = \frac{E_p}{gh}$$

Remplazando queda tal que:

$$m = \frac{540,0j}{(9,8g)(9,0m)}$$

Teniendo en cuenta las unidades

$$m = \frac{540,0kg \cdot \frac{m^2}{s^2}}{\left(9,8 \frac{m}{s^2}\right)(9,0m)}$$

Cancelamos términos iguales

$$m = 6,12244kg$$

La respuesta es 6,12244 kg

2. Un carro de masa 1000 kg tiene una velocidad de  $30 \text{ m/s}$ . ¿Cuál sería su energía cinética?. Posteriormente frena y su velocidad se reduce a la mitad, ¿Cuál es ahora su energía cinética?. Calcula el trabajo realizado por los frenos.

Datos:

$$m = 1000kg$$

$$v_1 = 30 \text{ m/s}$$

El problema dice que su velocidad se reduce a la mitad entonces inferimos que esta nueva velocidad queda  $\frac{30\text{ m/s}}{2} = 15\text{ m/s}$

$$v_2 = 15\text{ m/s}$$

La ecuación para la energía cinética es:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Ahora reemplazamos los datos para ambos casos

$$E_{c1} = \frac{1}{2}(1000\text{ kg})(30\text{ m/s})^2 \quad E_{c1} = 450.000\text{ kg m}^2/\text{s}^2 \quad E_{c1} = 450.000\text{ j}$$

$$E_{c2} = \frac{1}{2}mv^2 \quad E_{c2} = 112.500\text{ kg m}^2/\text{s}^2 \quad E_{c2} = 112.500\text{ j}$$

La ecuación para el trabajo es:

$$w = \Delta E_c \quad w = E_{cf} - E_{ci}$$

Reemplazando queda:

$$w = (450.000\text{ j}) - (112.500\text{ j}) \quad w = -337.500\text{ j}$$

Respuesta la energía cinética al comienzo es 450.000j y al finalizar 112.500j y su trabajo es -337.500j

a) Calcula la energía cinética de un objeto de una moto que pesa 200 kg que se mueve a una velocidad de  $60\text{ km/h}$ , utilizando la teoría clásica.

b) Calcula la energía correspondiente utilizando la famosa ecuación  $E=mc^2$  de la teoría de la relatividad especial. Utiliza los siguientes datos: la masa (m) del objeto es 2 kg y la velocidad de la luz (c) es  $3 \times 10^8\text{ m/s}$ . Infiera cómo utilizar la ecuación basándote en los ejemplos previos y el ejercicio anterior.

### ACTIVIDAD 3

Analizar y debatir los conceptos abordados en la TER, centrándose en cómo la TER desafía varias nociones de la teoría clásica. Se abordará la contracción de Lorentz, la dilatación del tiempo, los conceptos de masa, energía y fuerza en la teoría clásica y en la TER.

Preguntas para el debate:

1. Contracción de Lorentz:

¿Qué entendemos por contracción de Lorentz y cómo difiere de nuestra intuición clásica sobre el espacio y la longitud?

¿Cuál es el efecto de la velocidad en la contracción de Lorentz?

¿Qué ejemplos o experimentos respaldan la idea de la contracción de Lorentz?

2. Dilatación del tiempo:

¿Cómo se puede explicar la dilatación del tiempo en la TER?

¿Qué significa exactamente que el tiempo sea relativo y dependa de la velocidad?

¿Cuáles son las implicaciones prácticas de la dilatación del tiempo?

3. Concepto de masa:

En la teoría clásica, la masa se considera una propiedad intrínseca de un objeto. ¿Cómo cambia este concepto en la TER?

¿Cuál es la relación entre la masa y la energía según la ecuación  $E=mc^2$ ?

¿Puedes proporcionar ejemplos de cómo la masa puede convertirse en energía y viceversa?

4. Concepto de energía:

En la teoría clásica, la energía se considera una propiedad separada de la masa. ¿Cómo se relaciona la energía con la masa en la TER?

5. Concepto de fuerza:

¿Cómo se interpreta el concepto de fuerza en la TER en comparación con la teoría clásica?

¿Cuál es la relación entre fuerza, masa y energía en la TER?

¿Qué papel juega la curvatura del espacio-tiempo en la interpretación de la fuerza en la TER?

## MOMENTO 2

### Profundizando en la Relatividad Especial: Conceptos Fundamentales de la Equivalencia Masa-Energía

**OBJETIVO:** profundizar en el desarrollo

conceptual y las aplicaciones de la equivalencia

masa-energía, centrándose en la ecuación  $E = mc^2$ .

#### ACTIVIDAD 1

Lee con atención el siguiente texto:

"El siguiente texto es de autoría propia".

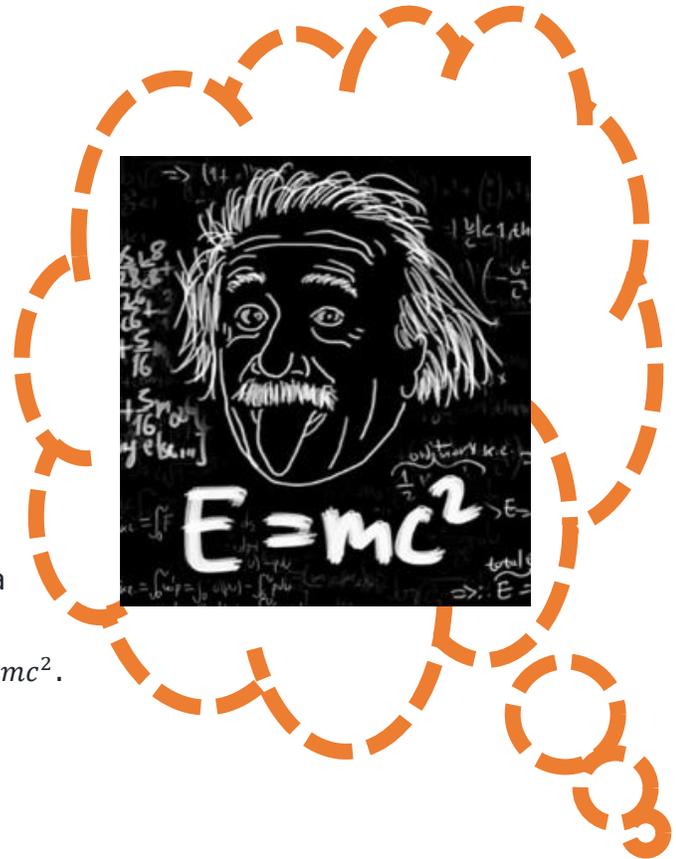
De forma genérica,  $E = mc^2$ , probablemente la ecuación más conocida en la actualidad, la cual sería uno de los aportes más significativos de la relatividad la cual es asociada a Einstein casi de inmediato.

Ya hemos visto la ecuación ahora que significa cada componente de esta, teniendo en cuenta que la ecuación completa es de la siguiente forma  $E = \gamma mc^2$ : Como ya se explicó anteriormente.

**E** la energía total del objeto en movimiento. En la relatividad, esta energía incluye tanto la energía en reposo del objeto (energía de masa) como la energía cinética de su movimiento. Se establece que la presencia de masa y energía tiene un impacto en la geometría del espacio-tiempo. Esto a su vez determina el movimiento de los objetos y cómo se relacionan gravitacionalmente, cabe resaltar que esta última explicación está relacionada la relatividad general.

**$\gamma$**  el componente menos conocido de la ecuación que es llamado factor de Lorentz. Este factor representado por la letra  **$\gamma$** , es una cantidad que depende de la velocidad relativa entre el objeto y el observador. Está relacionado con la dilatación del tiempo y la contracción de la longitud en la teoría de la relatividad. Se define como  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ , donde  **$v$**  es la velocidad del objeto y  **$c$**  es la velocidad

de la luz en el vacío. El factor de Lorentz sirve para que la energía cinética relativista aumente a medida que la velocidad del objeto se acerca a la velocidad



de la luz. Este componente de la ecuación no se suele tener en cuenta o no es visto debido a que cuando se trabaja con objetos en reposo o con velocidades bastantes menores que la velocidad de la luz, el factor de Lorentz se aproxima a 1 y es considerándose insignificante en comparación con la masa en reposo, dado estos casos la ecuación se simplifica y queda de la manera  $E = mc^2$ , omitiendo de esta manera el factor de Lorentz. Sin embargo, cuando las velocidades son significativas se deben tener en cuenta los efectos relativistas, para estos casos es necesario incluir el factor de Lorentz en la ecuación para obtener una descripción precisa.

$m$  es la masa que se tiene cuando está en reposo relativo, es decir, cuando no se mueve respecto a un observador. Es de mencionar que en relatividad general, la masa de un objeto en movimiento se distingue en dos tipos: masa gravitacional y masa inercial. La masa gravitacional mide la interacción de un objeto con el campo gravitatorio, que depende de la curvatura del espacio-tiempo. Cuanto mayor sea la masa gravitacional de un objeto, mayor será la fuerza gravitatoria que siente. La masa inercial mide la resistencia de un objeto a cambiar su estado de movimiento cuando se le aplica una fuerza. Cuanto mayor sea la masa inercial de un objeto, mayor será la fuerza necesaria para acelerarlo o frenarlo.

$c$  es la velocidad de la luz en el vacío, que es una constante fundamental en la teoría de la relatividad. La velocidad de la luz es una cantidad extremadamente grande y es la velocidad límite que puede alcanzar cualquier objeto con masa. A su vez es siempre la misma para cualquier observador, independientemente de su movimiento relativo. Esto implica que la luz se propaga a la máxima velocidad posible y establece un límite para la velocidad de cualquier objeto en el universo. Ahora bien en la ecuación  $c$  esta elevado al cuadrado esto es para relacionar la energía y la masa de manera proporcional. Las implicaciones físicas de tener  $c$  elevado al cuadrado son significativas. Nos indica que la cantidad de energía contenida en una masa determinada es enorme, ya que la velocidad de la luz al cuadrado es un valor extremadamente grande. Significa que incluso una pequeña cantidad de masa puede contener una gran cantidad de energía. Implica que la materia no es simplemente sólida o inerte. Además, esta ecuación ha llevado a reflexiones filosóficas sobre la naturaleza de la realidad, el significado del tiempo y el espacio, y la comprensión de la materia y la energía como manifestaciones de una entidad más fundamental.

En base al texto realiza los siguientes puntos:

1. Completa las siguientes afirmaciones relacionadas con la ecuación  $E = mc^2$ :

- La ecuación  $E = mc^2$  es conocida como \_\_\_\_\_.
- $E$  representa la \_\_\_\_\_ del objeto en movimiento.
- $\gamma$ , el factor de Lorentz está relacionado con la \_\_\_\_\_ del tiempo y la \_\_\_\_\_ de la longitud.
- $m$  se refiere a la \_\_\_\_\_ del objeto en reposo.

e)  $c$  es la \_\_\_\_\_ en el vacío y representa la velocidad límite que puede alcanzar cualquier objeto con masa.

2. Responde verdadero o falso a las siguientes afirmaciones: a) El factor de Lorentz,  $\gamma$ , se aproxima a 1 cuando la velocidad del objeto es significativamente menor que la velocidad de la luz. ( )

b) La masa en la teoría especial de la relatividad es constante, independientemente de la velocidad del objeto. ( )

c) La velocidad de la luz es una constante fundamental en la teoría de la relatividad. ( )

d) La ecuación  $E=mc^2$  muestra que incluso una pequeña cantidad de masa puede contener una gran cantidad de energía. ( )

3. Define brevemente los siguientes conceptos:

a) Contracción de Lorentz:

b) Dilatación del tiempo:

c) Masa gravitacional:

d) Masa inercial o pesante:

## ACTIVIDAD 2

Analiza las siguientes situaciones y determina si se deben considerar los efectos relativistas (utilizando el factor de Lorentz) para obtener una descripción precisa responde sí o no y justifica tu respuesta:

a) Un objeto en reposo. ( )

b) Un avión volando a una velocidad de 800 km/h. ( )

c) Una partícula acelerada en un acelerador de partículas a una velocidad cercana a la velocidad de la luz. ( )

Analiza la siguiente pregunta: ¿Cuáles son las implicaciones filosóficas y conceptuales de la ecuación  $E=mc^2$  en nuestra comprensión de la realidad, el tiempo, el espacio, la materia y la energía?

### Ejemplos:

(Los ejercicios que se harán respecto a la equivalencia masa-energía no se tendrá en cuenta el factor Lorentz)

Ejemplo 1: En un proceso de fisión nuclear se utilizó 0,5 kg de Plutonio 239, observándose una liberación de 90 TJ (esta unidad es terajulios, es una unidad del sistema internacional de unidades y equivale a 1 billón, en notación científica  $10^{12}$ ) de energía. ¿Qué porcentaje de masa inicial no se convirtió en energía?

Solución: Primero es de mencionar que para este ejercicio no se utiliza el factor Lorentz debido a que la velocidad del Plutonio 239 en proceso de fisión no es significativamente cercana a la velocidad luz.

Datos:

$$m = ?$$

$$E = 90 \times 10^{12}$$

$$c = 3 \times 10^8$$

Ahora usamos  $E = mc^2$  y reemplazamos con los datos que ya tenemos:

$$90 \times 10^{12} = m(3 \times 10^8)^2$$

Por propiedades de los exponentes, el exponente 2 se multiplica con el exponente 1 que tiene el 3 y el exponente 8 que tiene el 10 quedando de la siguiente manera:

$$90 \times 10^{12} = m(3^2 \times 10^{16})$$

Despejando  $m$  y resolviendo en calculadora:

$$m = \frac{90 \times 10^{12}}{3^2 \times 10^{16}} \quad m = 10^{-3} \text{ kg}$$

En este momento aún no hemos llegado a la respuesta que nos están pidiendo ya que este calculo que hemos hecho nos dio la masa que si se convirtió en energía que fue de  $10^{-3}$ , para hallar la masa que no ser

convirtió que en este caso llamaremos  $m_o$  en energía hacemos una simple resta:

$$0,5kg - 10^{-3} = m_o \quad \text{o escrito de otra manera } 0,5kg - 0,001kg = m_o$$

Y esto nos da:

$$m_o = 0,499kg$$

Ahora la pregunta nos pide un porcentaje entonces realizamos el cálculo pertinente:

$$\frac{0,5 - 0,001}{0,5} \times 100\% = 99,8\%$$

Como podemos inferir del cálculo hecho el porcentaje de masa que se convirtió en energía fue demasiado ínfimo y aun así ese pequeño porcentaje que es solo 0,001kg libero 90 terajulios de energía es decir 9.000.000.000.000 julios.

**Ejercicio:** Teniendo en cuenta el ejemplo anterior y el texto leído, intenta dar una explicación de porque solo un porcentaje tan pequeño de masa se convirtió en energía: \_\_\_\_\_

---



---



---



---



---

**Ejemplo 2:** En la detonación de una bomba atómica, se observa que de 1kg de Uranio 235, el 10% se convierte en energía. Determine ¿Cuántos julios de energía se han producido?

Datos:

$$c = 3 \times 10^8$$

Para el caso de la masa el problema nos dice que el 10% de 1kg si se convirtió en energía entonces tendremos en cuenta esto para la masa que nos ayudara en los cálculos:

$$m = 10\%1kg \quad \text{escrito de otra manera } m = \frac{10}{100} \times 1$$

$$\text{Simplificando queda } m = \frac{1}{10} kg = 0,1kg$$

$$\text{Usamos la formula } E = mc^2 \text{ y reemplazamos: } E = 0,1(3 \times 10^8)^2$$

Distribuimos el exponente 2 y queda:

$$E = 0,1(3^2 \times 10^{16})$$

$$\text{Dándonos como resultado } E = 9,10^{15}j$$

En este caso, se puede observar cómo un porcentaje mayor, del 10%, de la masa se convierte en una cantidad aún más alta de energía en comparación con el ejemplo anterior. En esta ocasión, la energía liberada es de  $9,10^{15}$  julios, lo cual se denomina 9PJ (Petajulios), una unidad de medida equivalente a  $10^{15}$  julios.

Es importante destacar que, a pesar de ser un porcentaje relativamente pequeño de una masa de solo 1 kg, sigue siendo impresionante la cantidad de energía liberada. Es sorprendente cómo se puede obtener una cantidad tan significativa de energía a partir de partes tan diminutas de masa.

### MOMENTO 3

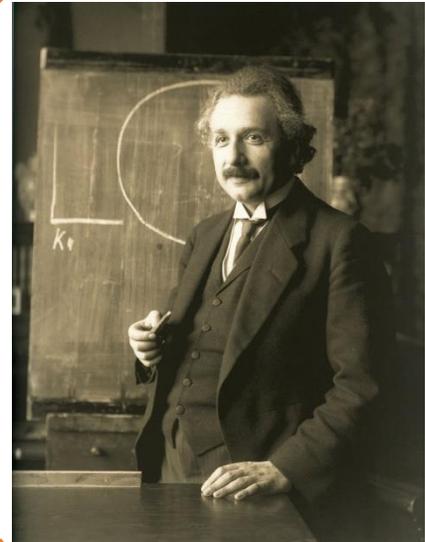
## EQUIVALENCIA MASA-ENERGÍA, IMPLICACIONES Y CONSECUENCIAS, REPASO DE CONCEPTOS

**OBJETIVO:** Realizar una reflexión y

conclusión sobre la equivalencia masa-energía,

debatir sobre sus implicaciones y consecuencias,

y repasar los conceptos clave y aplicaciones de esta relación.



### ACTIVIDAD 1

Lee detenidamente el siguiente texto

"El siguiente texto es de autoría propia".

Para llegar a la ecuación  $E = mc^2$  Einstein relacionó conceptos de la física clásica y la TER. Parafraseando, usando la mecánica clásica y el momento de la radiación, se deduce que la luz de energía  $E$  le ha dado una masa  $m = \frac{E}{c^2}$  (Solves & Tarin, 2008). Uno de estos conceptos es el que indica que la energía se conserva y se puede transformar. Otro es que la masa de un objeto aumenta con su velocidad y se hace infinita al llegar a la velocidad de la luz. Un tercero es que la energía y el momento de un objeto están relacionados. Un cuarto concepto, que fue clave para la deducción de Einstein, es que la luz tiene energía y momento, y que se propaga en el vacío con una velocidad constante  $c$ , independiente de la fuente o el observador. Este concepto se basa en las ecuaciones de Maxwell, que describen el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos, y que predicen la existencia de las ondas electromagnéticas, como la luz. Las ecuaciones de Maxwell también implican que la luz no tiene masa, ya que de lo contrario no podría alcanzar la velocidad  $c$ . Como es mencionado por Sorbes y Tarín:

En 1906 Einstein dedujo, de dos formas diferentes, una relación entre la energía y la masa. De acuerdo con uno de los procedimientos se obtiene el resultado  $E = mc^2$ . Para ello, se utilizan las ecuaciones de Maxwell del campo electromagnético y se hace uso de una aproximación hasta el término  $\frac{v}{c}$ . (Solves & Tarin, 2008, p. 175).

La ecuación de la equivalencia masa-energía se puede deducir matemáticamente a partir de las transformaciones de Lorentz, que describen cómo se transforman

las magnitudes físicas cuando se cambia de un sistema de referencia a otro que se mueve a una velocidad constante.

La ecuación indica que una pequeña cantidad de masa puede contener una gran cantidad de energía. Por ejemplo, en procesos nucleares como la fisión nuclear, una pequeña cantidad de masa se convierte en una gran cantidad de energía, como las encontradas en el interior del Sol. Esta conversión implica la transformación de la masa en diferentes formas de energía, como la energía térmica, energía radiante o la energía potencial. Este concepto se contrapone a la intuición clásica de que la masa es indestructible, según esta concepción, la masa de un objeto es constante y no puede ser creada ni destruida. Esta idea se basaba en la noción intuitiva de que la masa era una propiedad fundamental de la materia y no puede cambiar. En la teoría de la relatividad la masa no es una cantidad fija e inmutable, sino como ya se ha mencionado anteriormente esta depende de la velocidad del objeto observado. A medida que la velocidad de un objeto se acerca a la velocidad de la luz, su masa aparente aumenta.

La equivalencia es una teoría moderna que supera los límites de la física clásica. Por lo tanto, no se aplica a las situaciones cotidianas, donde la masa y la energía se conservan por separado. Cuando se dice que la masa es una forma de energía, se refiere a que la masa tiene una cantidad de energía intrínseca asociada a ella de acuerdo con la ecuación. Sin embargo, la energía en sí misma es un concepto más amplio que abarca diversas formas, como la energía cinética, la energía potencial, la energía térmica, etc.

### ACTIVIDAD 1

Selecciona la respuesta correcta:

1. ¿En qué se diferencia la concepción clásica de la masa como una propiedad inmutable de la materia de la perspectiva de la teoría de la relatividad? ¿Cómo influye la velocidad del objeto en su masa aparente?

a) La concepción clásica considera la masa como una propiedad inmutable, mientras que la teoría de la relatividad la ve como variable. La velocidad del objeto no afecta su masa aparente.

b) La concepción clásica considera la masa como variable, mientras que la teoría de la relatividad la ve como inmutable. La velocidad del objeto influye en su masa aparente.

c) La concepción clásica y la teoría de la relatividad coinciden en que la masa es inmutable. La velocidad del objeto no afecta su masa aparente.

2. Explica cómo la ecuación  $E=mc^2$  desafía la noción intuitiva de que la masa es indestructible. ¿Qué tipos de energía pueden resultar de la transformación de la masa según esta ecuación?

a) La ecuación  $E=mc^2$  respalda la noción de que la masa es indestructible. La transformación de la masa solo resulta en energía cinética.

b) La ecuación  $E=mc^2$  desafía la noción de que la masa es indestructible, ya que permite la conversión de masa en energía. Los tipos de energía resultantes pueden incluir energía térmica, energía radiante y energía potencial.

c) La ecuación  $E=mc^2$  respalda la noción de que la masa es indestructible. La transformación de la masa solo resulta en energía gravitacional.

3. ¿Qué condiciones extremas se requieren para que ocurra una conversión significativa de masa en energía o viceversa? Proporciona ejemplos de situaciones donde se observen estas condiciones.

a) Las conversiones de masa en energía o viceversa pueden ocurrir en condiciones normales sin requerir condiciones extremas.

b) Se requieren condiciones extremas, como procesos nucleares o la creación y aniquilación de partículas subatómicas, para una conversión significativa de masa en energía o viceversa.

c) La conversión de masa en energía o viceversa solo es posible en condiciones de alta temperatura y presión, como en el interior del Sol o durante la formación de estrellas.

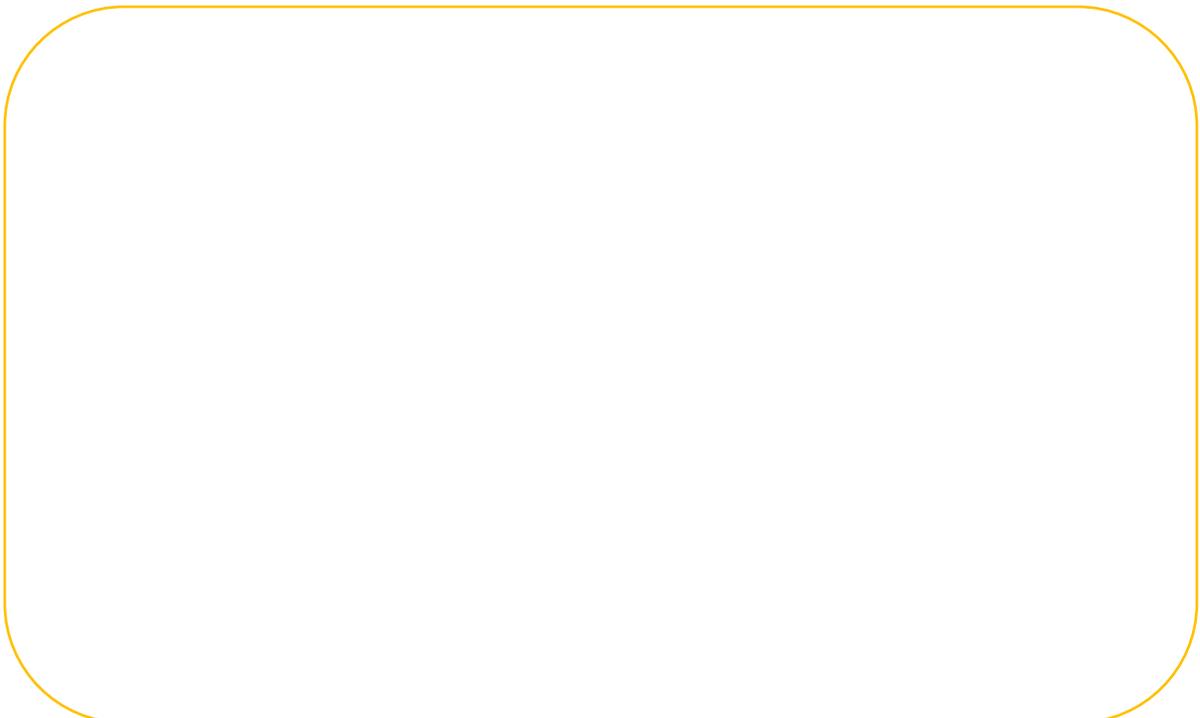
Pregunta abierta:

¿Cuál es la principal conclusión que se puede extraer de la ecuación de equivalencia masa-energía en términos de la relación entre la masa y la energía?

## ACTIVIDAD 2

Resuelve el siguiente ejercicio:

1. En un proceso de fisión nuclear se utilizó 0,77 kg de plutonio 239, se observó una liberación de energía de 96 TJ de energía. ¿Qué cantidad de masa no se convirtió en energía?



### ACTIVIDAD 3

Preguntas para el debate y la discusión sobre las implicaciones y consecuencias de la equivalencia masa-energía:

¿Cuál es la importancia histórica de la famosa ecuación  $E=mc^2$  y cómo ha influido en el desarrollo de la física moderna?

¿Cuáles podrían ser las implicaciones económicas de la capacidad de convertir masa en energía?

¿Cómo se relaciona la equivalencia masa-energía con el concepto de conservación de la energía en los sistemas físicos?

¿Existen límites en la conversión de masa en energía? ¿Cuáles podrían ser y cómo podrían afectar nuestro conocimiento y tecnología?

¿Qué preguntas o problemas sin resolver crees que plantea la equivalencia masa-energía?