



MODELACIÓN SUBATÓMICA MEDIANTE LA TEORÍA ESPECIAL DE LA RELATIVIDAD

Osman David Rivera Polanco

Profesor de Educación Media con mención en Física-Matemática

Correo electrónico: osmandavidriverap3@gmail.com

ORCID: 0009-0003-5166-3066

Ángel Isaac Martínez Olivas

Profesor de Educación Media con mención en Física-Matemática

Correo electrónico: angel99martines12@gmail.com

ORCID: 0009-0000-4309-0737

Cliffor Jerry Herrera Castrillo

Doctor en Matemática Aplicada

Correo electrónico: cliffor.herrera@unan.edu.ni

ORCID: 00009-0002-7663-2499

Institución: Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua (UNAN-Managua)

Recibido: 18 de mayo de 2026.

Aceptado: 08 de Julio de 2026

Received: May 18, 2026

Accepted: July 08, 2026



Resumen

La Teoría Especial de la Relatividad (TER) constituye uno de los pilares fundamentales de la física moderna y representa un marco teórico indispensable para comprender los procesos subatómicos. El presente ensayo analiza cómo la TER permite modelar fenómenos que ocurren a velocidades cercanas a la de la luz, particularmente en partículas elementales y sistemas relativistas. Se analizan las ideas clave sobre los cambios en el espacio y el tiempo, la relación entre masa y energía, y cómo el tiempo se alarga. Estos conceptos ayudan a entender sucesos que la física tradicional no puede explicar. También se ven sus usos reales en máquinas que aceleran partículas y en pruebas de alta energía, donde la teoría demuestra ser muy precisa. El estudio también incluye lo que esta teoría no puede explicar, como los sucesos al azar que se estudian en mecánica cuántica, y subraya la importancia de crear nuevas teorías que unan todo para entender mejor de qué está hecha la materia y cómo interactúan las fuerzas básicas del universo. Finalmente, se concluye que la TER continúa siendo una base científica sólida para la investigación contemporánea y un puente hacia nuevas teorías unificadoras en la física moderna.

Palabras clave: Relatividad especial; modelación relativista; partículas subatómicas; factor de Lorentz; muones atmosféricos; aceleradores de partículas.

SUBATOMIC MODELING USING THE SPECIAL THEORY OF RELATIVITY

Abstract

The Special Theory of Relativity (STR) is one of the fundamental pillars of modern physics and provides an indispensable theoretical framework for understanding subatomic processes. This essay analyzes how the STR allows us to model phenomena that occur at speeds close to that of light, particularly in elementary particles and relativistic systems. It examines key ideas regarding changes in space and time, the relationship between mass and energy, and how time dilates. These concepts help explain events that traditional physics cannot account for. It also explores their practical applications in particle accelerators and high-energy experiments, where the theory proves to be highly accurate. The study also includes what this theory cannot explain, such as the random events studied in quantum mechanics, and underscores the importance of creating new theories that bring everything together to better understand what matter is made of and how the fundamental forces of the universe interact. Finally, it concludes that SRT remains a solid scientific foundation for contemporary research and a bridge toward new unifying theories in modern physics.

Key Words: Special relativity; relativistic modeling; subatomic particles; Lorentz factor; atmospheric muons; particle accelerators.

1. Introducción

La comprensión de los procesos subatómicos representa uno de los desafíos más complejos de la física contemporánea. En escalas microscópicas, las partículas elementales presentan comportamientos que no pueden explicarse mediante las leyes de la mecánica clásica, especialmente cuando alcanzan velocidades cercanas a la velocidad de la luz. Ante esta situación, la Teoría Especial de la Relatividad (TER), formulada por Albert Einstein en 1905, se consolidó como un marco teórico esencial para describir y modelar fenómenos relativistas (Ortuño Blandón et al., 2025; Resnick, 1977).

La relevancia de la TER radica en que cambia profundamente la visión tradicional del espacio, el tiempo y la energía. Ideas que antes se consideraban absolutas en la física de Newton han sido reinterpretadas desde un enfoque relativista (Kaku, 2004). Esto ha permitido explicar fenómenos como la dilatación del tiempo, la contracción de la longitud y la equivalencia entre masa y energía (Talavera et al., 2025). Estas transformaciones son esenciales para entender el comportamiento de partículas subatómicas en aceleradores y colisionadores de alta energía.

En este ensayo, la modelación subatómica se entiende como la representación matemática del comportamiento de partículas elementales que se desplazan a velocidades cercanas a la velocidad de la luz (Castro Rojas, 2009). Esta modelación no se limita a describir conceptos relativistas, sino que permite estimar magnitudes observables como el tiempo de vida, la energía, el momento lineal y la trayectoria de partículas en sistemas de alta energía (Herrera Castrillo, 2023). Por ello, se sostiene que la Teoría Especial de la Relatividad no solo modificó la comprensión del espacio y el tiempo, sino que constituye una herramienta matemática indispensable para interpretar fenómenos subatómicos verificables experimentalmente.

El objetivo de este ensayo es analizar cómo la TER permite modelar fenómenos que ocurren a velocidades cercanas a la de la luz, particularmente en partículas elementales y sistemas relativistas. También se abordan las limitaciones de esta teoría en relación con la mecánica cuántica y la necesidad de avanzar hacia modelos integradores que sean capaces de explicar la estructura fundamental de la materia.

A partir de este análisis se sostiene la tesis de que la TER continúa siendo una herramienta científica indispensable para la investigación moderna, no solo por su capacidad predictiva, sino también porque constituye la base conceptual sobre la cual se desarrollan nuevas teorías relacionadas

con la física de altas energías y la unificación de las interacciones fundamentales (Castro & Olaya, 2019; Aleman Berenguer, 2009).

2. Desarrollo temático

Fundamentos relativistas en la modelación subatómica

La Teoría Especial de la Relatividad se fundamenta en dos postulados esenciales: las leyes de la física son iguales para todos los sistemas de referencia inerciales y la velocidad de la luz en el vacío permanece constante independientemente del movimiento del observador. Estos principios revolucionaron la física moderna, ya que demostraron que el espacio y el tiempo no son absolutos, sino relativos al estado de movimiento de cada observador (Resnick, 1977).

Los contrastes entre la física clásica y la teoría especial de la relatividad reflejan un cambio asombroso en la concepción del universo físico. Mientras que la mecánica clásica consideraba el espacio y el tiempo como magnitudes absolutas, independientes del observador, la relatividad proponía una visión dinámica y relativa de estas dimensiones (Mendibil Larrucea, 2025). En la Tabla 1 se presentan algunas diferencias fundamentales entre ambas escuelas de física.

Tabla 1

Comparación entre la física clásica y la teoría especial de la relatividad

Aspecto	Física clásica	Relatividad especial
Espacio	Absoluto	Relativo
Tiempo	Universal	Dependiente del observador
Velocidad de la luz	Variable	Constante
Masa y energía	Independientes	Equivalentes
Movimiento	Absoluto	Relativo

Nota. La comparación presentada resume algunas diferencias fundamentales entre la física clásica y la teoría especial de la relatividad, destacando los cambios conceptuales relacionados con el espacio, el tiempo, el movimiento y la velocidad de la luz.

La formulación de la Teoría Especial de la Relatividad supuso un cambio profundo respecto a la mecánica newtoniana (Resnick, 1977). En la física clásica se asumía que el espacio y el tiempo eran magnitudes absolutas e independientes del observador; sin embargo, los problemas asociados a la propagación de la luz y a la invariancia de su velocidad exigieron una

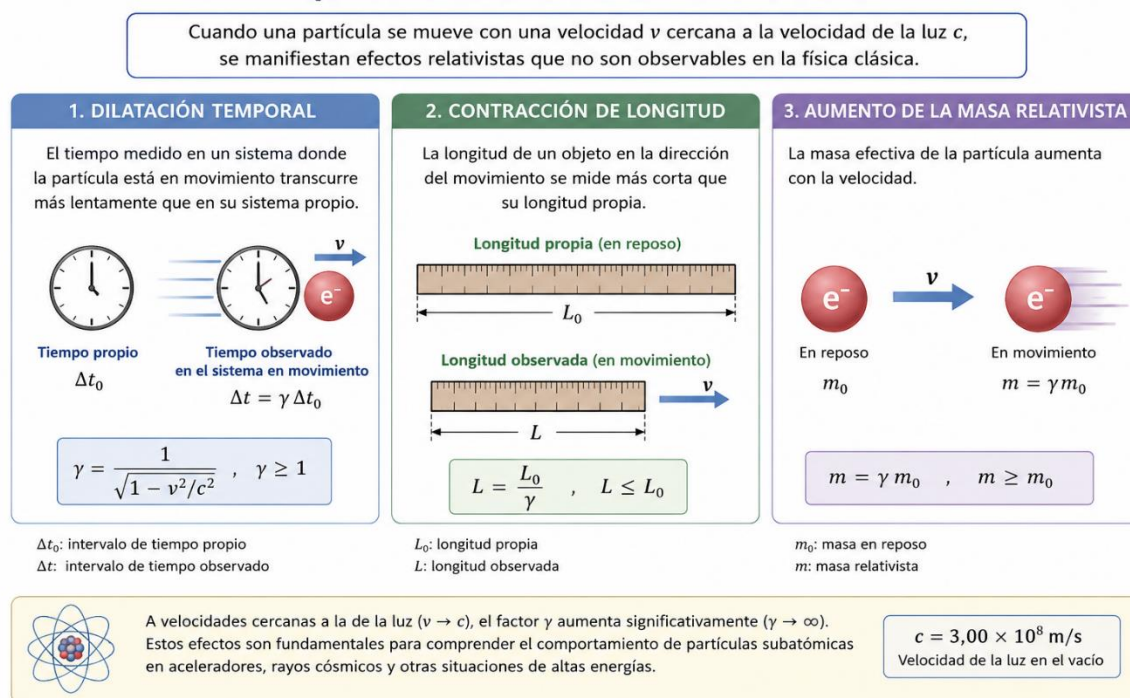
nueva interpretación. Desde la perspectiva relativista, las coordenadas espaciales y temporales dependen del sistema de referencia, lo cual permitió construir modelos más precisos para describir partículas que se desplazan a velocidades cercanas a la luz (Castillo-Castillo et al., 2023).

En el ámbito subatómico, estas ideas adquieren gran relevancia debido a que muchas partículas elementales se desplazan a velocidades extremadamente altas. Bajo estas condiciones aparecen efectos relativistas imposibles de ignorar. Uno de ellos es la dilatación temporal, fenómeno según el cual el tiempo transcurre más lentamente para partículas que se desplazan a velocidades cercanas a la luz. Este fenómeno ha sido verificado de manera experimental en partículas inestables, como los muones, cuya duración media se incrementa notablemente cuando se desplazan a velocidades cercanas a la velocidad de la luz.

Los efectos de la relatividad se hacen muy claros cuando las partículas alcanzan velocidades próximas a la velocidad de la luz. Acontecimientos como la dilatación del tiempo y el cambio en las magnitudes físicas ayudan a entender cómo se comportan las partículas subatómicas en sistemas de alta energía (Molina Gil, 2015). En la Figura 1 se presenta una representación conceptual de los principales efectos relativistas asociados al movimiento de partículas elementales.

Figura 1

Efectos relativistas en partículas subatómicas que se desplazan a altas velocidades.



Nota. Elaboración propia con base en los efectos relativistas de dilatación temporal, contracción de longitud y factor de Lorentz descritos por Resnick (1977).

Otro aspecto fundamental es la equivalencia entre masa y energía expresada mediante la relación:

$$E = mc^2$$

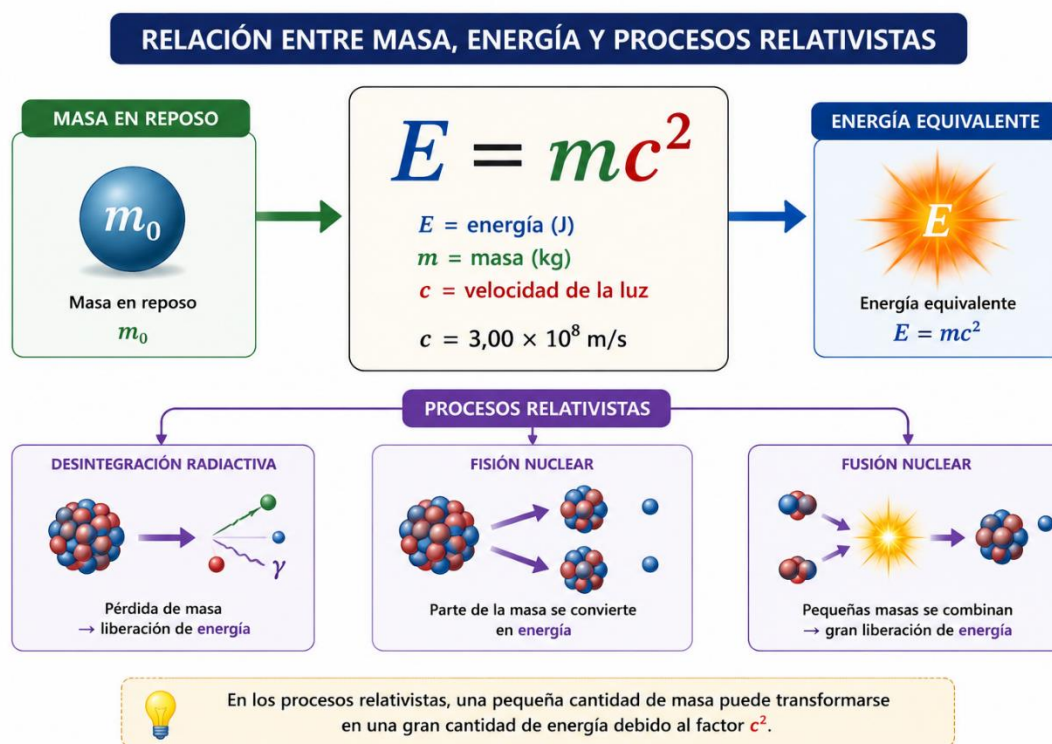
Esta ecuación demuestra que la masa puede transformarse en energía y viceversa, principio esencial para comprender las colisiones de partículas y los procesos nucleares (Talavera et al., 2025). Gracias a esta relación es posible explicar cómo pequeñas cantidades de masa generan enormes cantidades de energía en reacciones subatómicas.

La relación entre masa y energía formulada por Einstein constituye uno de los principios más importantes de la física moderna, ya que demuestra que ambas magnitudes representan manifestaciones equivalentes de un mismo fenómeno físico. Esta formulación permitió explicar diversos procesos nucleares y subatómicos relacionados con la liberación de

energía. En la Figura 2 se ilustra la relación conceptual entre masa, energía y procesos relativistas.

Figura 2

Relación entre masa, energía y procesos relativistas según la teoría especial de la relatividad.



Nota. Elaboración propia con base en la equivalencia masa-energía y su aplicación en procesos nucleares y relativistas, a partir de Einstein (2005) y Talavera et al. (2025).

La TER también introduce las transformaciones de Lorentz, las cuales permiten calcular cómo cambian las coordenadas espaciales y temporales entre observadores en movimiento relativo (Méndez López et al., 2025; Cesín Gorostieta, 2023). Estas transformaciones corrigen las limitaciones de la física clásica y posibilitan una descripción más precisa de trayectorias y energías en sistemas relativistas.

Uno de los conceptos fundamentales dentro de la Teoría de la Relatividad Especial es el llamado factor relativista o factor de Lorentz, que nos permite conocer cómo cambian ciertas magnitudes físicas cuando un cuerpo se acerca a la velocidad de la luz (Pascua Ramón, 2024). A medida

que incrementa la velocidad, el tiempo transcurre a un ritmo más lento y la energía requerida para que una partícula siga acelerando aumenta dramáticamente. Este efecto muestra por qué ninguna partícula con masa puede alcanzar la velocidad de la luz. Tales conceptos son básicos para comprender el comportamiento de los electrones, protones y otras partículas elementales en altas energías.

Procedimiento matemático para la modelación subatómica relativista

La modelación subatómica relativista parte de identificar una partícula con masa en reposo m_0 , velocidad v , tiempo propio τ , energía E , momento lineal p , cuando corresponde, carga eléctrica q . A diferencia de la mecánica clásica, donde el momento se expresa como $p = mv$ y la energía cinética como $K = \frac{1}{2}mv^2$, la relatividad especial introduce el factor de Lorentz, que corrige estas magnitudes cuando la velocidad de la partícula se aproxima a la velocidad de la luz. OpenStax resume estas relaciones mediante el momento relativista $p = \gamma mu$ y la energía total $E = \gamma mc^2$, expresiones necesarias para modelar partículas de alta energía (OpenStax, 2016).

El procedimiento básico de modelación puede organizarse en cuatro pasos: primero, se determina la velocidad de la partícula como fracción de la velocidad de la luz mediante $\beta = v/c$; segundo, se calcula el factor de Lorentz γ ; tercero, se estiman las magnitudes relativistas, como tiempo dilatado, energía total, energía cinética y momento; finalmente, los resultados se comparan con datos experimentales, por ejemplo, la vida media de muones atmosféricos o las energías alcanzadas en aceleradores de partículas (Einstein, 2005).

Al analizar cómo la Teoría Especial de la Relatividad ayuda a describir procesos subatómicos, resulta vital definir los factores y fórmulas clave para examinar partículas viajando a ritmos próximos a la luz. Tales ecuaciones facilitan calcular valores como el factor de Lorentz, la dilatación del tiempo, el acortamiento espacial, el impulso relativista y la energía general de un cuerpo. Por ello, la Tabla 2 agrupa los conceptos esenciales que funcionan como base para diseñar modelos relativistas usados en la investigación de muones del aire, electrones, protones y otras partículas dentro de ensayos de alta energía.

Tabla 2

Variables y ecuaciones básicas para la modelación subatómica relativista

Magnitud	Ecuación	Significado
Razón de velocidad	$\beta = \frac{v}{c}$	Indica qué fracción de la velocidad de la luz alcanza la partícula.
Factor de Lorentz	$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$	Mide el efecto relativista sobre tiempo, longitud, energía y momento.
Dilatación temporal	$\Delta t = \gamma \Delta \tau$	El tiempo medido en el laboratorio aumenta respecto al tiempo propio de la partícula.
Contracción de longitud	$L = \frac{L_0}{\gamma}$	La longitud observada disminuye en la dirección del movimiento.
Momento relativista	$p = \gamma m_0 v$	Corrige el momento clásico para partículas rápidas.
Energía total	$E = \gamma m_0 c^2$	Energía total de una partícula en movimiento relativista.
Energía en reposo	$E_0 = m_0 c^2$	Energía asociada a la masa en reposo.
Energía cinética relativista	$K = (\gamma - 1)m_0 c^2$	Energía debida al movimiento relativista.
Relación energía-momento	$E^2 = (pc)^2 + (m_0 c^2)^2$	Relaciona energía total, momento y masa en reposo.

Nota. Adaptado de Resnick (1977)

Además del tratamiento analítico, la modelación subatómica relativista puede expresarse mediante un procedimiento computacional básico. Este modelo permite ingresar los datos iniciales de una partícula y obtener magnitudes relativistas que luego pueden compararse con valores experimentales. De esta manera, la modelación no se limita a describir conceptos, sino que permite realizar estimaciones cuantitativas sobre el comportamiento de partículas en movimiento relativista.

Entrada:

m_0 = masa en reposo de la partícula

v = velocidad de la partícula

c = velocidad de la luz



Modelación subatómica mediante la Teoría Especial de la Relatividad

τ_0 = tiempo propio

q = carga eléctrica, si aplica

B = campo magnético, si aplica

Procedimiento:

$$\beta = v/c$$

$$\gamma = 1 / \sqrt{(1 - \beta^2)}$$

$$E_0 = m_0 c^2$$

$$E = \gamma m_0 c^2$$

$$K = (\gamma - 1)m_0 c^2$$

$$p = \gamma m_0 v$$

$$t_{\text{lab}} = \gamma \tau_0$$

$$d = v t_{\text{lab}}$$

Si la partícula se mueve en un campo magnético:

$$\rho = p / qB$$

Salida:

$$\beta, \gamma, E_0, E, K, p, t_{\text{lab}}, d, \rho$$

Este esquema muestra que la modelación subatómica mediante la TER implica definir variables, aplicar ecuaciones y obtener predicciones cuantitativas. Por ello, el uso de modelos matemáticos y computacionales fortalece la relación entre el título del ensayo y su desarrollo científico.

Ejemplo cuantitativo de muones atmosféricos

Para mostrar cómo opera la modelación relativista, puede considerarse el caso planteado por Frisch y Smith (1963) donde de un muón atmosférico que viaja a una velocidad aproximada de $v = 0.998c$. Según el Particle Data



Modelación subatómica mediante la Teoría Especial de la Relatividad

Group (2024), el muón posee una masa de $105.6583755 \text{ MeV}/c^2$ y una vida media propia de $2.1969811 \times 10^{-6} \text{ s}$. Primero se calcula el factor de Lorentz:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - 0.998^2}} \approx 15.82$$

Luego, el tiempo de vida observado desde la Tierra se estima mediante:

$$\Delta t = \gamma \Delta \tau = 15.82(2.1969811 \mu\text{s}) \approx 34.75 \mu\text{s}$$

Sin considerar la dilatación temporal, el muón recorrería aproximadamente:

$$d = v \Delta \tau \approx 657 \text{ m}$$

Pero al incorporar la corrección relativista, la distancia recorrida aumenta a:

$$d = v \Delta t \approx 10.4 \text{ km}$$

Este resultado explica por qué muchos muones producidos en la atmósfera logran llegar a la superficie terrestre, pese a su corta vida media propia. Por tanto, la TER no solo describe el fenómeno, sino que permite modelarlo matemáticamente y contrastarlo con observaciones experimentales. El experimento clásico de Frisch y Smith mostró precisamente la dilatación temporal en muones con velocidades cercanas a $0.996c$, comparando la cantidad esperada sin relatividad con la cantidad detectada al nivel del mar.

Aplicaciones de la TER en física de partículas

La modelación subatómica basada en la TER posee importantes aplicaciones experimentales y tecnológicas. En los aceleradores de partículas, como el CERN, protones y electrones son acelerados a velocidades cercanas a la velocidad de la luz, generando condiciones similares a las existentes en los primeros instantes del universo (Garay, 2023).

Otro ejemplo concreto se observa en el Gran Colisionador de Hadrones. CERN reporta que la energía nominal de los protones en el LHC es de 6.8 TeV por haz y que las colisiones protón-protón alcanzan 13.6 TeV. Si se



Modelación subatómica mediante la Teoría Especial de la Relatividad

toma la energía en reposo del protón como aproximadamente 0.938 GeV, el factor de Lorentz para un protón de 6.8 TeV se estima mediante:

$$\gamma = \frac{E}{m_p c^2} = \frac{6800 \text{ GeV}}{0.938 \text{ GeV}} \approx 7247$$

Este valor indica que los protones se desplazan a una velocidad extremadamente cercana a la de la luz:

$$v \approx 0.9999999905c$$

En este contexto, la trayectoria de las partículas cargadas se modela mediante la relación:

$$p = qB\rho$$

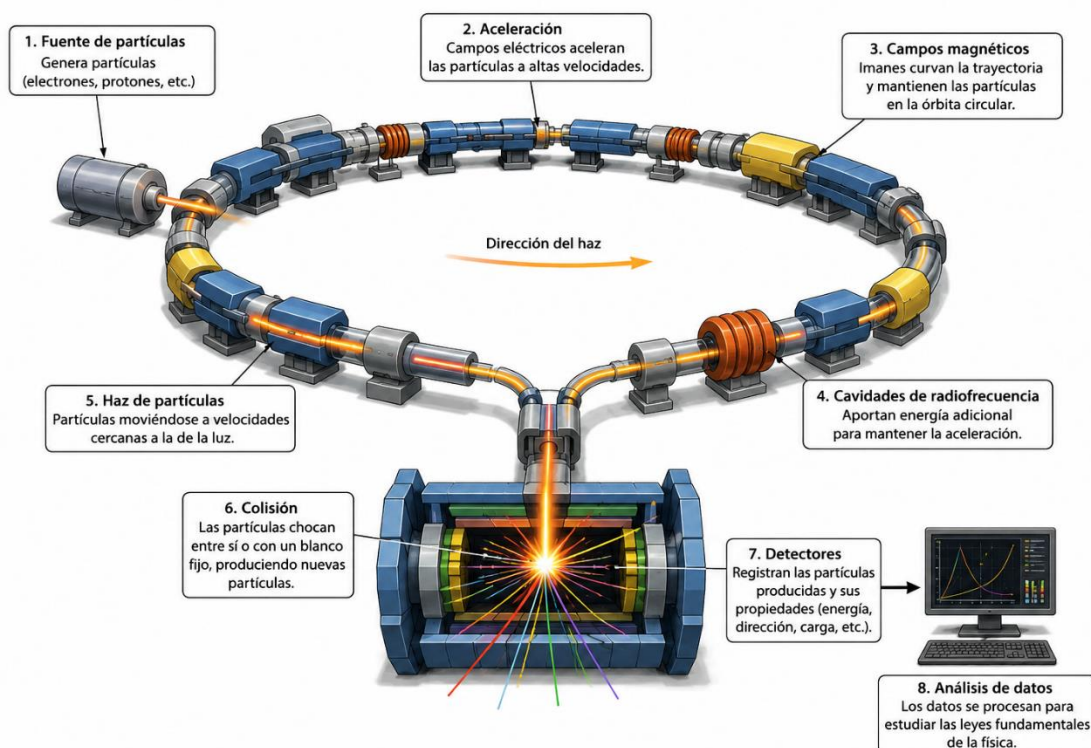
donde p es el momento relativista, q la carga de la partícula, B el campo magnético y ρ el radio de curvatura. Esta ecuación permite comprender por qué los aceleradores circulares requieren campos magnéticos intensos para mantener partículas de alta energía en una trayectoria curva. CERN explica que los imanes dipolares curvan el haz y que, cuanto mayor es la energía de la partícula, mayor debe ser el campo magnético necesario para modificar su trayectoria. En el LHC, los dipolos principales generan campos de aproximadamente 8.3 teslas y permiten mantener estable la trayectoria de los haces (CERN, s. f.).

En estos sistemas, la TER resulta indispensable para calcular trayectorias, masas relativistas y niveles energéticos. Sin la relatividad especial sería imposible interpretar correctamente los resultados obtenidos en experimentos de altas energías. Los colisionadores permiten estudiar partículas elementales, descubrir nuevas interacciones y analizar fenómenos relacionados con la estructura fundamental de la materia.

Los aceleradores y colisionadores de partículas constituyen uno de los principales escenarios experimentales donde la teoría especial de la relatividad demuestra su capacidad predictiva (Fuster Martínez & Esperante Pereira, 2025). En estos sistemas, las partículas son aceleradas mediante campos electromagnéticos hasta alcanzar velocidades relativistas, permitiendo estudiar interacciones fundamentales de la materia. La Figura 3 muestra de manera general el funcionamiento de un acelerador de partículas y su relación con la física relativista.

Figura 3

Representación general del funcionamiento de un acelerador de partículas basado en principios relativistas.



Nota. Elaboración propia con base en la descripción del funcionamiento de aceleradores de partículas presentada por CERN.

Un ejemplo importante corresponde a los muones producidos en la atmósfera terrestre. Según la física clásica, estas partículas deberían desintegrarse antes de llegar a la superficie terrestre. Sin embargo, debido a la dilatación temporal relativista, los muones logran recorrer distancias mayores y pueden ser detectados experimentalmente. Este fenómeno constituye una evidencia directa de la validez de la TER (Resnick, 1977).

Asimismo, la relatividad especial es también parte integral de la tecnología actual como los sistemas de posicionamiento global (GPS). Los satélites experimentan efectos relativos (velocidad, atracción gravitatoria de la Tierra) que fuerzan a que sus relojes necesiten ser corregidos continuamente para que la determinación de la posición se mantenga precisa (Molina Terra, 2022).

Las aplicaciones contemporáneas de la relatividad especial evidencian que sus aportes trascienden el ámbito teórico y poseen una influencia directa en el desarrollo tecnológico actual. Sistemas satelitales, investigaciones astronómicas y tecnologías de precisión requieren incorporar correcciones relativistas para garantizar resultados confiables (Rodríguez-Díaz et al., 2025). En la Figura 4 se presentan algunas aplicaciones modernas asociadas a la teoría especial de la relatividad.

Figura 4

Aplicaciones modernas de la teoría especial de la relatividad en ciencia y tecnología



Nota. Elaboración propia con base en aplicaciones contemporáneas de la relatividad especial en GPS, aceleradores de partículas, física de partículas, astronomía, medicina nuclear y tecnologías de precisión.

Relación entre relatividad especial y mecánica cuántica

A pesar de los importantes avances proporcionados por la TER, esta teoría presenta limitaciones cuando se estudian fenómenos gobernados por principios cuánticos. Mientras la relatividad especial describe sistemas continuos y deterministas, la mecánica cuántica introduce fenómenos



probabilísticos asociados al comportamiento de partículas elementales (Pérez Cortes, 2025).

La necesidad de aplicar ambos enfoques simultáneamente dio origen a teorías como la electrodinámica y la teoría cuántica de campos, que incorporan principios relativistas en un contexto cuántico. Estas teorías permiten describir, con gran precisión experimental, las interacciones entre partículas y el campo electromagnético.

No obstante, aún no se ha desarrollado una teoría definitiva que logre unificar completamente la relatividad y la mecánica cuántica. Los desafíos relacionados con la gravedad cuántica y la estructura del espacio-tiempo siguen siendo temas de investigación científica (Pérez Cortes, 2026). Esta situación indica que la física moderna está en un constante proceso de cambio y que las teorías actuales son aproximaciones progresivas hacia una comprensión más completa del universo.

Perspectivas científicas y desarrollo futuro

Las investigaciones contemporáneas apuntan hacia el desarrollo de modelos híbridos capaces de integrar relatividad, mecánica cuántica y simulaciones computacionales avanzadas. La utilización de inteligencia artificial, procesamiento masivo de datos y simulaciones numéricas ha permitido mejorar significativamente la modelación de procesos subatómicos.

Asimismo, la investigación de partículas inusuales, agujeros negros en miniatura y la posibilidad de dimensiones adicionales presenta nuevas oportunidades para la física moderna. En este marco, la Teoría de la Relatividad continúa siendo una herramienta teórica esencial que proporciona fundamentos matemáticos y físicos para futuras teorías unificadoras.

La modelación subatómica no posee únicamente valor teórico, sino también aplicaciones científicas y tecnológicas relevantes. Sus avances inciden en áreas como la medicina nuclear, la computación cuántica, la energía, las telecomunicaciones y las tecnologías de precisión. Por ello, la Teoría Especial de la Relatividad continúa siendo un fundamento indispensable para interpretar fenómenos de alta energía y para proyectar nuevas líneas de investigación en la física moderna.



3. Conclusiones

La Teoría Especial de la Relatividad constituye un marco teórico fundamental para la comprensión y modelación de procesos subatómicos. Sus principios permiten explicar fenómenos relativistas que la física clásica no podía interpretar, especialmente aquellos relacionados con partículas que se desplazan a velocidades cercanas a la de la luz.

El análisis realizado permite afirmar que la Teoría Especial de la Relatividad no solo transformó la comprensión del espacio, el tiempo y la energía, sino que proporciona un conjunto de ecuaciones útiles para modelar fenómenos subatómicos. El factor de Lorentz, la dilatación temporal, el momento relativista y la energía total permiten estimar magnitudes observables en partículas que se desplazan a velocidades cercanas a la luz.

Los casos de los muones atmosféricos y de las partículas aceleradas en colisionadores muestran que la TER posee capacidad predictiva y respaldo experimental. En los muones, la dilatación temporal explica que estas partículas puedan alcanzar la superficie terrestre; en los aceleradores, el cálculo de la energía, el momento y la curvatura de la trayectoria permite interpretar el comportamiento de partículas sometidas a campos electromagnéticos.

Por tanto, la modelación subatómica mediante la TER debe entenderse como un proceso que integra variables físicas, ecuaciones matemáticas y validación experimental. No obstante, esta teoría no agota la explicación del mundo subatómico, ya que los fenómenos probabilísticos requieren el aporte de la mecánica cuántica y de la teoría cuántica de campos. En consecuencia, la TER constituye una base necesaria, aunque no suficiente, para la comprensión integral de la física de partículas.

4. Referencias bibliográficas

- Alemañ Berenguer, R. A. (2009). Una aproximación geométrica a la equivalencia masa-energía en relatividad. *Latin-American Journal of Physics Education*, 3(1), 121-126. http://www.lajpe.org/jan09/19_Rafael_Aleman.pdf
- Castillo-Castillo, K. I., Hernández-Meza, G. A., & Herrera Castrillo, C. J. (2023). Estado del Arte de Investigaciones referente a Física Clásica y Moderna en el Período 2016 - 2021. *Educación Superior*, 22(35), 65-83. <https://doi.org/10.56918/es.2023.i35.pp65-83>
- Castro, H. F., & Olaya, H. (2019). Física cuántica y relatividad al servicio de la medicina: imágenes diagnósticas por tomografía de emisión de positrones (PET). *Momento: Revista de Física*, 1(59), 1-14. <https://doi.org/10.15446/mo.n59E.81626>
- Castro Rojas, R. (2009). Partículas. [Tesis de Maestría, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. <https://repository.udistrital.edu.co/items/6036a387-a661-4ee8-a82a-bc86db8f02f2>
- CERN. (s. f.). Pulling together: Superconducting electromagnets. <https://home.cern/science/engineering/pulling-together-superconducting-electromagnets/>
- Cesín Gorostieta, R. (2023). Estudio de Invariancia de Lorentz con el Observatorio de Rayos GammaHAWC. [Tesis de maestría]. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1009/2497/1/CESINGR_MA.pdf
- Einstein, A. (2005). Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento. *Teorema: Revista Internacional de Filosofía*, 24(2), 91-119. <https://www.jstor.org/stable/43046574>
- Frisch, D., & Smith, J. (1963). Measurement of the Relativistic Time Dilation Using μ -Mesons [Medición de la dilatación del tiempo relativista mediante mesones μ]. *Revista Americana de Física*, 31(5), 342-355. <https://doi.org/10.1119/1.1969508>
- Fuster Martínez, N., & Esperante Pereira, D. (2025). *Aceleradores de partículas : del laboratorio a la sociedad*. Editorial CSIC. <https://www.torrossa.com/en/resources/an/6016428>
- Garay, F. J. (2023). “Camino geométrico” en el espacio bidimensional de Minkowski para obtener las transformaciones de Lorentz y sus consecuencias. *Revista de la Escuela de Física*, 11(1), 114-126. <https://doi.org/10.5377/ref.v11i1.16825>
- Herrera Castrillo, C. J. (2023). Interdisciplinariedad a través de la Investigación en Matemática y Física. *Revista Chilena de Educación Matemática*, 15(1), 31-45. <https://doi.org/10.46219/rechiem.v15i1.126>
- Kaku, M. (2004). *El universo de Einstein: cómo la visión de Albert Einstein transformó nuestra comprensión del espacio y el tiempo*. Antoni Bosch, editor. https://www.academia.edu/43630442/EL_UNIVERSO_DE_EINSTEIN
- Méndez López, H. A., Quiroz González, O. E., Gaitán Rizo, H. J., & Herrera-Castrillo, C. J. (2025). Metodología Activa Novedosa para la evaluación por competencia en el aprendizaje de las Ecuaciones de Lorentz (MANPEC). *Revista Oratores*, 1(22), 39-55. <https://doi.org/10.37594/oratores.n22.1721>
- Mendibil Larrucea, X. (2025). ¿Qué es lo real? Relatividad general, mecánica cuántica y la fractura ontológica de la física moderna. [Tesis de Grado, Repositorio de la Universidad Europea]. Universidad Europea. <https://titula.universidadeuropea.com/handle/20.500.12880/12105>



Modelación subatómica mediante la Teoría Especial de la Relatividad

- Molina Gil, R. (2015). De lo subatómico a lo inmenso: Sobre la posible influencia de la Teoría de la Relatividad y la Mecánica Cuántica en lo fantástico. *Brumal. Revista de investigación sobre lo Fantástico*, 3(2), 177-202. <https://revistes.uab.cat/brumal/article/view/v3-n2-molina>
- Molina Terra, N. V. (2022). *GPS y Correcciones Relativistas*. Instituto Latino-Americano de Ciências da Vida e da Natureza (ILACVN) — Engenharia Física. <https://dspace.unila.edu.br/server/api/core/bitstreams/cd8a137e-6b4a-47fc-8681-4d4cc1399be7/content>
- OpenStax. (2016). *University Physics Volume 3*. Rice University. <https://openstax.org/details/books/university-physics-volume-3>
- Ortuño Blandón, A. I., Ferrufino Amador, E. A., Herrera Castrillo, C. J., & López Maradiaga, E. O. (2025). Cuento didáctico: un camino hacia la relatividad desde un modelo por competencias. *Educación Superior*(39), 53-72. <https://doi.org/10.56918/es.2025.i39.pp53-72>
- Particle Data Group. (2024). Review of Particle Physics. *Physical Review D*, 110, 030001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.110.030001>
- Pascua Ramón, G. (2024). Fenomenología de violación de invariancia Lorentz en la física de neutrinos de muy alta energía. *[Trabajo Fin de Grado]*. Universidad de Zaragoza. <https://zaguan.unizar.es/record/149484>
- Pérez Cortes, J. A. (2025). Expansión Fundamental: Relatividad y Mecánica Cuántica Unificadas por la Expansión del Universo. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(5), 17934-17969. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i5.21627
- Pérez Cortes, J. A. (2026). Teoría para Unificar la Relatividad y Mecánica Cuántica Conectadas por la Expansión del Universo. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(5), 18021-18038. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i5.21811
- Resnick, R. (1977). *Introducción a la Teoría Especial de la Relatividad*. Impreso en México [784]. https://www.academia.edu/39674448/INTRODUCCION_A_LA_TEORIA_ESPECIAL_DE_LA_RELATIVIDAD_EDITORIAL_LIMUSA
- Rodríguez-Díaz, J. E., López-Díaz, R. d., Pérez-Ruiz, G. E., & Herrera Castrillo, C. J. (2025). Aprendiendo las aplicaciones de la Teoría Especial de la Relatividad en un modelo por competencias en Educación Superior. *Cognosis: Revista de Ciencias de la Educación*, 10(1), 53-65. <https://doi.org/10.33936/cognosis.v10i1.7075>
- Talavera, J. I., García López, H. D., Salmerón Herrera, J. J., & Herrera Castrillo, C. J. (2025). Actividades con recursos tecnológicos para el desarrollo de la temática equivalencia masa energía. *Revista Educativa HEKADEMOS*(37), 56-66. <https://hekademos.com/index.php/hekademos/article/view/103>