

UNA APROXIMACIÓN AL TÓPICO DE ONDAS GRAVITACIONALES PREVIO UN
ABORDAJE CONCEPTUAL DE LAS PRINCIPALES IDEAS DE LA TEORÍA DE LA
RELATIVIDAD

JUAN CARLOS MORENO TORRES

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

2023

UNA APROXIMACIÓN AL TÓPICO DE ONDAS GRAVITACIONALES PREVIO UN
ABORDAJE CONCEPTUAL A LAS PRINCIPALES IDEAS DE LA TEORÍA DE LA
RELATIVIDAD

JUAN CARLOS MORENO TORRES

Trabajo de grado presentado para optar por el título de Licenciado en Física

Asesora:

CARMEN EUGENIA FONSECA CUENCA

Línea de investigación: Enseñanza y aprendizaje de las ciencias - Enfoques Didácticos

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

2023

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a Dios, fuente de esperanza y vida, quien me acompaña en todas mis jornadas, así mismo, a mi linda esposa Xiomara, cuyo amor, compañía y apoyo incondicional ha sido determinante en la conclusión de esta etapa de mi vida, a mi bella hija Emily, quien me inspira a superarme cada día, a mi padre, madre y hermanas quienes me han brindado su apoyo y cariño durante todos estos años, a mi asesora, la profesora Carmen Fonseca por el gran apoyo que me brindó en la culminación de este trabajo.

Contenido

Introducción	1
Capítulo 1. Planteamiento del problema	3
1.1 Contexto situación problema.....	3
1.2. Objetivos	5
1.2.1. Objetivo general	5
1.2.2. Objetivos específicos	5
1.3. Justificación.....	5
1.4. Antecedentes	8
Capítulo 2. Acerca de la relatividad general	10
2.1. Marcos acelerados y relatividad especial	10
2.2. Necesidad de una nueva teoría de la gravitación	11
2.2.1. Visión clásica de masa inercial y gravitacional	12
2.3. Noción de campo gravitacional.....	13
2.4. El inicio de la relatividad generalizada	14
2.5. Principio de equivalencia	14
2.5.1. Equivalencia entre marcos inerciales y acelerados.....	15
2.5.2. Equivalencia entre gravedad y aceleración	18
Capítulo 3. Pruebas de la relatividad general.....	22
3.1. Precesión apsidal	23
3.1.1. Precesión apsidal de la órbita de mercurio	24
3.2. Deflexión gravitacional de la luz	27
3.2.1. Confirmación experimental de la curvatura de la luz.....	29
3.3. Efecto Doppler gravitacional	31
3.3.1. Confirmación experimental del efecto Doppler gravitacional	32
3.3.2. Dilatación gravitacional del tiempo.....	32
3.4. Otros test de la relatividad general	33
Capítulo 4. Ondas gravitacionales	35
4.1. Predicción de ondas gravitacionales	37
4.2. Detección indirecta de ondas gravitacionales	38
4.2.1. Pulsar de Hulse y Taylor	38

4.2.2. Decaimiento del periodo orbital de PSR 1913+16	40
4.3. Fuentes de ondas gravitacionales	41
4.3.1. Efectos de las ondas gravitacionales	41
4.3.2. Fuentes de ondas gravitacionales detectables en Tierra	42
4.4. Detección de ondas gravitacionales	43
4.4.1. Interferometría láser en la detección de ondas gravitacionales	44
4.5. Acerca del origen del proyecto Ligo	47
4.6. Acerca de la caracterización de las ondas gravitacionales	48
Conclusiones	50
Bibliografía	52

Introducción

A nivel nacional e internacional la enseñanza de la física en la educación secundaria aparentemente está concentrada en las concepciones clásicas, este panorama es desalentador si se tiene en cuenta que las actuales investigaciones que se desarrollan en esta disciplina suelen tomar como referentes las concepciones de la denominada física moderna surgida en el siglo XX. En efecto, suele ser común que en la escuela no se procuren introducir elementos conceptuales que permitan a los estudiantes conocer los tópicos de actualidad en este campo de la ciencia (Macias, 2014).

Ahora, si se tiene en cuenta que la física surgida en el siglo XX ha proporcionado elementos teóricos y conceptuales que difunden una visión precisa del mundo físico y que a su vez han influido significativamente en el desarrollo científico y tecnológico de la humanidad. Se considera entonces importante que en el proceso de enseñanza-aprendizaje de esta ciencia, se procure tener presente las concepciones clásicas y modernas, sus puntos en común, alcances y limitaciones. Cabe señalar que tanto la Física Clásica como la Moderna, cada una plantea una interpretación distinta de la naturaleza, aun así, la visión clásica y moderna se relacionan de tal forma que, en aquellas temáticas en las que el cuerpo teórico de una no logra interpretar y dar solución a algunos fenómenos físicos particulares, la otra interviene para proveer una respuesta a estos.

En correspondencia con lo anterior, uno de los objetivos de la enseñanza de la Física debería ser que el educando logre forjar una estructura coherente y ordenada de esta disciplina científica, y que sea capaz de reconocer como ha sido su desarrollo y así mismo posea nociones acerca de las diferencias y aspectos en común entre el paradigma clásico y moderno en la interpretación de los fenómenos físicos.

Lo anterior, ha sido un foco de investigación en la enseñanza de la Física durante un amplio periodo de tiempo, en donde generalmente se ha buscado establecer puentes didácticos que permitan a docentes y estudiantes comprender la relación existente entre las concepciones clásicas y modernas al igual que los alcances y limitaciones de cada una (Macias, 2014). No obstante, si se tiene en consideración que cualquier aporte que se procure hacer en relación a esto, no solo requiere una comprensión de las nociones clásicas, sino que también exige un entendimiento previo del desarrollo de las ideas que cimientan las teorías modernas, lo cual que puede representar

un obstáculo para aquellos docentes e investigadores que en su ejercicio profesional intentan hacer aportación alguna en pro de introducir en la educación secundaria algunas de las ideas físicas modernas.

Con el propósito de aportar en sentido a futuras investigaciones, el presente documento procura brindar una aproximación conceptual a la noción de ondas gravitacionales y su caracterización previo a un abordaje de algunos de los antecedentes de la teoría de relatividad general y las ideas conceptuales en las que se cimienta.

Se presenta entonces esta investigación, en la modalidad de trabajo monográfico, compuesta por cuatro capítulos. En el primer capítulo se sienta un contexto de la situación problema, donde se resalta, según distintos investigadores algunos de los obstáculos que suelen impedir la introducción en la escuela de las ideas de la física moderna. En el segundo capítulo, se mencionan algunas de las razones que condujeron al planteamiento de una nueva teoría de la gravitación, se hace un abordaje del principio de equivalencia de relatividad general y algunas de sus principales implicaciones en el entendimiento del fenómeno gravitacional. En el tercer capítulo, se describe las principales pruebas que validaron la relatividad general, la descripción precisa del avance del perihelio de Mercurio y algunas de las predicciones más representativas de la teoría, derivadas del principio de equivalencia. En el cuarto capítulo, se hace un abordaje histórico del desarrollo teórico del tópico de ondas gravitacionales, y finalmente, se presentan las conclusiones.

Capítulo 1. Planteamiento del problema

1.1 Contexto situación problema

Es un hecho que en la actualidad muchas de las predicciones de los planteamientos teóricos en Física que se hicieron a principios del siglo XX se han verificado exitosamente. Un claro ejemplo de esto se puede encontrar en la reciente detección de ondas gravitacionales a mediados de la última década, descubrimiento que se corresponde con una de las predicciones de la Teoría General de la Relatividad y el cual ha generado gran revuelo en distintos medios de comunicación. Campos de investigación como la Cosmología y Astrofísica prevén que este tipo de ondas puede proporcionar una nueva forma de explorar el universo.

Ahora, si se tiene en consideración que la mayoría de noticias que se publican acerca de los estudios y avances en física revelan que son los asuntos derivados de la física moderna sobre los que indagan los científicos. Sucede entonces que mientras los físicos analizan la naturaleza en el marco de la física del siglo XX. Según Macías (2014), en la escuela predomina la enseñanza de nociones clásicas, en los currículos escolares la física de Newton y Maxwell suele tener un lugar privilegiado que al parecer no es indiferente a los docentes, quienes desde su formación inicial suelen carecer de una enseñanza sólida de las ideas y principios que cimientan las teorías modernas de la física. Conllevando esto a que la cultura científica escolar no acompañe el desarrollo de la ciencia, ni sus avances tecnológicos y se distancia de ellos cada día más (Fernández, Gonzales, Solbes, 1997).

Es así como, mientras en la escuela predomina la visión clásica de la física, en internet, y otros medios de comunicación como noticias, youtubers, películas, revistas y periódicos suele promoverse la visión moderna, al divulgarse los hallazgos científicos que surgen de las investigaciones más recientes. Según Fernández, Gonzales y Solbes (1997) parte de esta información es receptada por jóvenes en etapa escolar, despertando en ellos interés por conocer más de los intrigantes temas de física moderna, sobre los que seguramente surgirán dudas que buscarán aclarar con sus profesores de física, quienes quizás tendrán dificultad para responder de forma precisa y clarificadora. En efecto, mientras los estudiantes acuden al colegio con intriga sobre la actualidad de la ciencia física, las ideas que afirman los actuales temas de investigación no son abordadas en clase (Ostermann y Moreira, 2000).

En referencia a lo anterior, el hecho de que en la escuela secundaria la enseñanza de las concepciones que fundamentan las teorías físicas modernas suele ser escasa o excluida en el peor de los casos, es una problemática que han citado múltiples investigaciones sobre enseñanza de la física, en las que suele plantearse las siguientes razones que la originan: desconexión del currículum escolar de la física que utilizan los científicos como referente para comprender y estudiar el mundo físico, falta de interés por parte de algunos docentes sobre estos temas a causa de las imposiciones del currículo o por la ausencia de estas temáticas en los programas de formación, complejidad de las concepciones físicas modernas que representan un gran reto para el aprendizaje tanto para docentes y estudiantes, falencias en programas de formación docente en los que el abordaje de las ideas físicas modernas suele ser limitado, escasez de recursos referenciales que orientan la enseñanza, carencia de material de texto con un enfoque conceptual, de investigaciones en las que se analice qué tipo de concepciones son factibles de enseñar y cómo hacerlo, estrategias de aprendizaje, material didáctico y experimental, entre otros (Macías, 2014).

Por otro lado, de acuerdo con los argumentos comunes de distintos autores como Aubrecht, 1986; Kalmus, 1992 y Terrazzan, 1994, entre otros, en sus trabajos investigativos sobre la enseñanza de la física moderna en la escuela, la introducción de las ideas físicas del siglo XX en la educación secundaria puede contribuir a que los estudiantes se sientan interesados por la ciencia física, asimilen la práctica científica como una actividad humana que no es lejana de su vivencia cotidiana, se motiven por estudiar carreras científicas, tengan una visión más precisa de la física y la naturaleza del trabajo científico, entre otras.

Expuesta la situación problema y confiriendo especial interés al tópico de ondas gravitacionales que se cimienta en la noción de gravedad de la relatividad general. Se plantea la siguiente pregunta problema.

¿Qué ideas de la relatividad general pueden favorecer la aproximación a la noción de onda gravitacional?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Realizar un abordaje de las principales ideas de la relatividad general e implicaciones que favorecen la aproximación a la noción de onda gravitacional.

1.2.2. Objetivos específicos

- Hacer una revisión bibliográfica de los planteamientos de la Teoría de la Relatividad, analizando su pertinencia en el abordaje de las ondas gravitacionales.
- Identificar aquellos planteamientos que posibilitaron la incorporación del fenómeno gravitacional en la relatividad especial y los que anunciaron la necesidad de una nueva teoría de la gravedad.
- Hacer una revisión de las principales predicciones de relatividad general cuya puesta a prueba a lo largo del siglo XX y XXI ha otorgado validez científica a la teoría.
- Elaborar un marco referencial del tópico de ondas gravitacionales, en el que se aborde de forma contextual la evolución teórica y experimental de las mismas, a su vez, se caractericen.

1.3. Justificación

No es desconocido que el siglo XX estuvo marcado por un vertiginoso avance científico y tecnológico que concluyó en una nueva visión y entendimiento del mundo, especialmente, en el ámbito de la física, la aparición de algunos fenómenos incompatibles con las teorías clásicas sugieren replantear las mismas e influyen en la formulación de nuevas ideas que posteriormente cimentaron las teorías físicas modernas, relatividad general, mecánica cuántica y electrodinámica cuántica, cuyas predicciones iniciales han conseguido probarse experimentalmente en virtud del desarrollo tecnológico alcanzado en los siglos XX y XXI. Son estas teorías, las que además de proporcionar los referentes actuales a partir de los que se comprende y estudia la naturaleza y el

universo, a su vez, anuncian la existencia de escenarios y fenómenos inconcebibles, en los que desde el siglo XX hasta la época actual, suele ocuparse la práctica científica.

Particularmente, la relatividad general, teoría moderna de la gravitación formulada a principios del siglo XX, con su noción de gravedad como consecuencia de la curvatura del espacio producto de la interacción del mismo con distribuciones de masa y energía, en contraste con la ley de gravitación universal de Newton y su idea de fuerza central de atracción, proporcionó una visión más profunda y precisa del fenómeno gravitacional que condujo al descubrimiento de nuevos fenómenos presentes en nuestro universo, no concebidos en la visión clásica, por ejemplo, deflexión gravitacional de la luz, dilatación gravitacional del tiempo, corrimiento al rojo gravitacional, ondas gravitacionales, entre otros. Así mismo, anunció la existencia de cuerpos y sistemas estelares inimaginables, fuera del alcance de la formulación matemática de la gravedad clásica, estrellas mucho más masivas que nuestro sol, pero de tamaños mucho más reducidos, como compactas estrellas de neutrones y hoyos negros, también sistemas estelares binarios, entre otros; generándose así una revolución en la visión y entendimiento del fenómeno gravitacional y el universo.

Ahora bien, acerca de las ondas gravitacionales, desde finales del siglo XX y en lo que lleva el siglo XXI, han estado posicionadas como uno de los focos de investigación en física que concentra gran expectación científica. De hecho, después de la primera detección de este tipo de radiación en septiembre de 2015 y las subsecuentes por parte de los observatorios estadounidenses LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory), posteriormente en colaboración con el observatorio europeo Virgo en Italia, actualmente se suman esfuerzos a nivel mundial para mejorar los instrumentos y técnicas de detección, a su vez, se trabaja e indaga en proyectos que contemplan la construcción de instrumentos que permitan detectar este tipo de ondas en una banda de frecuencias más amplia de la que se ha alcanzado en los instrumentos actuales, intensificándose así el rastreo de las mismas (Sintes y Sorazu, 2017).

En correspondencia con lo anterior, con frecuencia distintos medios suelen publicar información en su mayoría divulgativa acerca de los avances en el tópico, eventos detectados, fuentes de emisión que en general suelen corresponderse con fusiones de hoyos negros y estrellas de neutrones, desarrollo de proyectos en marcha y futuros, además de las posibles aportaciones en la comprensión del universo. De hecho, recientemente en junio del 2023, a nivel mundial se

anunció un hallazgo que generó gran revuelo en la comunidad científica, así mismo en los medios de comunicación, el observatorio para ondas gravitacionales de baja frecuencia NANOGrav (North American Nano-Hertz Observatory for Gravitational Waves) confirmó experimentalmente la existencia de un fondo estocástico de radiación gravitacional, correspondiente a una combinación de ondas gravitacionales de baja frecuencia, en una banda de 10^{-6} Hz hasta 10^{-9} Hz , según estimaciones matemáticas, provenientes de las interacciones entre gigantescos hoyos negros en núcleos galácticos, sistemas estelares binarios de muchas masas solares, entre otro tipo de fuentes aún no modeladas matemáticamente, es decir, desconocidas; fondo que mantendría en constante vibración la geometría espacial, respecto al cual los científicos se han referido como la sinfonía del universo (The NANOGrav Collaboration, 2023).

Por otro lado, si se tiene en consideración la problemática expuesta anteriormente en torno a las dificultades que obstaculizan el acercamiento de la escuela secundaria a las nociones derivadas de la física moderna, en las que destacan las imposiciones del currículo, la falta de formación de los profesores en este ámbito de la física, la escasez de documentos enfocados en un abordaje conceptual y didáctico de los temas modernos de física para ese nivel. A su vez, teniendo presente que los estudiantes asisten a la escuela con información sobre los recientes hallazgos en física que les pueden resultar sumamente interesantes, para poder conservar el interés en ellos, es necesario intentar superar las dificultades expuestas anteriormente, esto exige abordar en clase las ideas derivadas de la física moderna, en las que ahondan los científicos actualmente, lo cual, puede ser suplido con el diseño de estrategias didácticas fundamentadas en marcos sólidos y acompañadas de material didáctico para docentes y estudiantes (Arriasecq y Greca, 2018).

No obstante, la elaboración de estrategias didácticas o cualquier otro material de enseñanza, aun para el nivel secundario, exige una comprensión previa de las teorías físicas modernas, lo cual, puede representar un reto para aquellos docentes que pretenden hacer aportación alguna para introducir en la escuela secundaria las ideas modernas de la física (Macias, 2014). De modo que, teniendo en cuenta que, para el diseño de estrategias didácticas, material conceptual u actividades de otro tipo en torno a la introducción del tópico de ondas gravitacionales en la escuela, es imprescindible un conocimiento previo de las ideas en las que se cimienta la relatividad general.

Con el propósito de hacer un aporte en este sentido, el presente documento se corresponde con una monografía que pretende brindar una aproximación conceptual a la noción de ondas

gravitacionales y su caracterización previo a un abordaje también conceptual de las ideas de la relatividad general dirigido a aquellos estudiantes de la Licenciatura en física, docentes en ejercicio, e incluso investigadores que tengan la necesidad de ahondar en el tema de ondas gravitacionales en un nivel conceptual, que estén en búsqueda de un entendimiento de la teoría previo a la posible elaboración de estrategias de aprendizaje introductorias al tópico de ondas gravitacionales en la escuela, pudiendo el trabajo, aliviar un poco lo extenuante que puede resultar comprender la teoría y a sí mismo caracterizar las ondas gravitacionales.

1.4. Antecedentes

Arriasecq. I y Greca. M, (2018), Ondas gravitacionales en contexto para la escuela secundaria: física contemporánea, divulgación científica y género, Revista de enseñanza de la física. El objetivo de los autores fue desarrollar una secuencia didáctica que les permitiera introducir el concepto de onda gravitacional en la escuela secundaria. Dentro de las razones que motivan a los autores a realizar la secuencia didáctica se mencionan algunas de las situaciones que dificultan la enseñanza de tópicos modernos como, por ejemplo: el escaso número de textos didácticos diseñados para este fin, la introducción desestructurada que se refleja en los pocos textos que intentan enseñar estos temas, a esto se le agrega el hecho de que no se contemplen los hallazgos más recientes. También hacen referencia a que hay una carencia de formación de los profesores que se refleja en el hecho de que, aparentemente, no consiguen dar respuestas sólidas a las preguntas de los estudiantes que estén relacionadas con los temas actuales de investigación.

Senent. F y Solbes. J, (1986), Análisis crítico de la introducción de la física moderna a la educación media, Valencia-España. En este trabajo se analizó de forma crítica los textos didácticos dirigidos a la enseñanza de temas de Física Moderna, también se indagó y reflexionó con respecto a las preconcepciones que los profesores en formación tienen con respecto a estas. Las razones que sustentan este trabajo surgen de una expectativa, con relación a que los estudiantes, de últimos grados de secundaria y los de primeros semestres de carreras universitarias con énfasis en la Física, deben estar en la capacidad de abordar estas temáticas aplicando las concepciones modernas. La realidad es que, para alcanzar el cumplimiento de este cometido, hay que superar la barrera problemática que dificulta e impide el eficiente proceso de enseñanza-aprendizaje de las teorías modernas de la Física. Para ello los autores procuran analizar y describir aquella barrera. Con base en los datos obtenidos de su investigación ellos afirman que los textos de enseñanza introducen

los temas de la teoría moderna de forma individual sin exponer sus orígenes, causas y discrepancias experimentales con la teoría clásica, esto termina produciendo que el estudiante tenga una imagen deformada de la física. También agregan que es necesario que las universidades capaciten en temas modernos a los profesores en formación ya que estos son los que finalmente podrán aportar al cambio de este panorama. Este trabajo proporcionó una idea y descripción de las situaciones que dificultan la enseñanza de temas de la Física Moderna en la escuela.

Acosta. L, (2017), Diseño de una secuencia didáctica para introducir algunos conceptos fundamentales de la Relatividad Especial a partir del análisis de la Geometría de Minkowski, UPN. En este trabajo se buscó diseñar una secuencia didáctica que aborda la enseñanza de algunos conceptos de la Teoría Especial de la Relatividad (TER) a partir del análisis gráfico de diagramas de Minkowski. Los conceptos de la TER involucrados en la secuencia didáctica fueron: dilatación, contracción del espacio – tiempo, simultaneidad y causalidad. Finalmente se buscó que los estudiantes de secundaria a quienes estaba dirigido este trabajo logaran comprender estos conceptos desde el enfoque del análisis gráfico de la geometría de Minkowski. Este trabajo aporta a la presente investigación en el aspecto académico, ya que permite fortalecer conocimientos teóricos de la TER a través de una estrategia didáctica para comprender algunos conceptos con base en la interpretación gráfica de los diagramas de Minkowski; también en el ámbito investigativo ya que tiene en cuenta algunos de los aspectos que son motivadores de esta propuesta de investigación, en relación con la necesidad de analizar y reflexionar sobre las discordancias que hay entre las concepciones clásicas y modernas de la Física. 1.

Capítulo 2. Acerca de la relatividad general

A continuación, se expone cómo fue presumiblemente la etapa inicial del camino que condujo a Einstein a la formulación de la teoría general de la relatividad. Según Sánchez (2004) “La construcción de esta teoría llevó a Einstein muchos más esfuerzos que los que empleó para llegar a la teoría especial. Podemos, en efecto, datar en 1907 su primer esfuerzo significativo por desarrollar una teoría relativista de la gravitación” (p.155). Por lo cual, la exposición únicamente se centra en el trasfondo conceptual derivado de este primer esfuerzo, a partir del cual él madura sus ideas y sienta las bases conceptuales antes de llegar al auge de la teoría, momento al cual por sí solo no consiguió llegar debido a su insuficiencia matemática. Específicamente, las geometrías no euclidianas como las de Riemann, las de Gregorio Ricci-Curbastro y Tullio Levi Civita eran las que se ajustaban a la estructura conceptual de la gravedad que él había concebido, pero estas estaban por fuera de su dominio académico (Sánchez, 2004). La ayuda llegó en 1913 cuando finalmente gracias a la ayuda de Marcel Grossman quien había estudiado geometría diferencial, logra realizar una primera formulación matemática del principio de equivalencia.

2.1. Marcos acelerados y relatividad especial

En principio, cabe recordar que la teoría de relatividad especial o también denominada relatividad restringida se fundamenta en dos postulados, el principio de relatividad especial que establece que las leyes de la física deben ser las mismas en todo marco de referencia inercial y la invariancia de la velocidad de la luz, según la cual independientemente del marco de referencia en donde se mida su magnitud, siempre resultará un mismo valor igual a 3×10^8 m/s, lo cual fue constatado imprevistamente por los resultados del experimento de Michelson y Morley que desacreditan la existencia del éter (medio hipotético en el que los físicos del siglo XIX pensaron se propagaba la luz) y de forma anticipada prueban la constancia de la velocidad de la luz formulada por Einstein en años posteriores, fijándose un límite para la velocidad de propagación de cualquier señal en el universo.

De acuerdo con el primer postulado, la relatividad especial únicamente es válida en marcos inerciales, concebidos en reposo o movimiento uniforme y aislados de la influencia de cualquier fuerza capaz de acelerarlos, motivo por el cual, para marcos acelerados o también denominados no inerciales la relatividad especial pierde validez y consecuentemente termina excluyendo el

fenómeno gravitacional: cualquier marco de referencia que se halle bajo la acción de un campo gravitacional mantendrá una aceleración constante.

Consciente Einstein de que su relatividad especial estaba inacabada por no admitir la gravedad, se dispuso a complementar la misma con el fin de formular una relatividad generalizada en la que el principio de relatividad especial extendiera su validez a marcos acelerados, reconciliando así la gravitación con la teoría (Ramos, 2018). Desafío que consiguió superar de forma ingeniosa al dilucidar que la experiencia de un observador en caída es indistinguible a la de un observador en reposo, siendo posible a partir de esta premisa establecer una relación de equivalencia entre marcos acelerados e inerciales; gracias a esto fue posible enlazar el principio de relatividad especial con los marcos bajo influencia gravitacional.

Por otro lado, otro desafío que surgió, pero no pudo ser superado, fue el acople de la relatividad especial con la gravitación universal, teoría en la cual, la interacción gravitacional se corresponde con una fuerza de acción a distancia instantánea, lo cual es incongruente con la invarianza de la velocidad de la luz que fija una velocidad límite que no puede ser superada por ninguna señal en el universo (Bonder, 2018). Adicionalmente, al someter las ecuaciones de la gravedad clásica a cambios de coordenadas, matemáticamente su forma varía, contradiciendo esto el principio de relatividad especial, de modo que, no son invariantes en las transformaciones de Lorentz (Janssen, 2013).

2.2. Necesidad de una nueva teoría de la gravitación

Ante la incompatibilidad de la relatividad especial con la gravitación universal, surge la necesidad de formular una nueva teoría de la gravedad que satisfaga los postulados de la relatividad de Einstein y a su vez compagine con la gravedad clásica. Asunto que según Janssen (2013) Einstein resolvió al reflexionar en el principio de equivalencia formulado siglos atrás por Galileo Galilei, en el cual se plantea que masa inercial y gravitacional son equivalentes, principio que puede considerarse pretendió dar razón del por qué los cuerpos independientemente de su tamaño, masa y composición al soltarse a la vez desde una misma altura alcanzan simultáneamente el suelo. Intuitivamente podría pensarse que el cuerpo de menor masa inercial alcanza primero el suelo al ser más fácil de acelerar o, por el contrario, que el de mayor masa lo hace más rápido por ser la magnitud de la acción gravitacional mayor sobre este, no obstante, esto no ocurre en la naturaleza y el universo. Dos observadores de diferente tamaño y masa que saltan al mismo tiempo de un

avión, en su caída alcanzan las mismas velocidades, de modo que pueden observarse uno junto al otro flotando en aparente reposo, escenario semejante a la ausencia de gravedad. Siendo esta universalidad de la caída libre la que permite asociar marcos inerciales con marcos acelerados, posibilitando la relación de equivalencia entre reposo y aceleración que condujo a Einstein hacia una nueva teoría de la gravedad.

Según algunos autores, Jansen y otros, se presume que Einstein y sus colegas no comprendían muy bien la equivalencia entre masa inercial y gravitacional, la mecánica clásica no proporcionaba una explicación concisa del por qué estas cantidades resultan ser iguales (Jansen, 2013). No obstante, el principio de equivalencia de la relatividad general contribuyó a dilucidar este incomprensible asunto, al proporcionar una interpretación sucinta en la que se contempló la existencia de fuerzas gravitacionales ficticias debidas a la inercia de objetos que han estado en contacto con un marco acelerado.

2.2.1. Visión clásica de masa inercial y gravitacional

De acuerdo con Hacyan (1995) la equivalencia entre masa inercial y gravitacional fue planteada inicialmente por Galileo quien analizó la caída libre a través de experimentos con planos inclinados, con base en estos concluyó que este movimiento resultaba ser independiente de la masa de los cuerpos p (69). Esto mismo expone Janssen (2013) en el capítulo 9 de su libro de texto:

El origen de la relatividad especial data del siglo XVII, cuando Galileo Galilei formuló su principio de relatividad. (...) también las raíces de la relatividad general remontan a esa época (...) cuando personas como Galilei y Simón Stevin empezaban a darse cuenta de que la velocidad que alcanzan los objetos en caída es independiente de la masa (...), en contraste con la intuición cotidiana y la física aristotélica. (...) Galilei sacó sus conclusiones sobre la caída libre dejando rodar bolas en planos inclinados y las publicó en su libro *Motu* en 1590. (p.137)

En efecto, la caída libre tiene un carácter universal, el movimiento que experimenta cualquier cuerpo sometido a un campo gravitacional no depende de la masa inercial y gravitacional, tampoco de la carga o cualquier otro tipo de propiedad de los cuerpos; siempre tiene lugar de la misma forma, hay una variación de velocidad que es influenciada únicamente por la magnitud del campo gravitacional (Ramos, 2018).

Por otro lado, este principio resulta ser intrigante si se tiene en cuenta que todos los cuerpos tienen una medida distinta de masa inercial y masa gravitacional, aparece entonces el siguiente cuestionamiento ¿Cómo se explica que en el movimiento de caída aparezca la relación de equivalencia entre la masa inercial y gravitacional? De acuerdo con Hacyan (2020), si se tiene en cuenta que la aceleración de un cuerpo es proporcional a la razón entre su masa gravitacional e inercial (m_i/m_g), al fijar igual a uno la constante de proporcionalidad de la razón es posible hablar indistintamente de masa inercial y gravitacional.

Por consiguiente, la explicación del por qué dos cuerpos con distintas masas inerciales y gravitacionales llegan a la vez al suelo, corresponde a que matemáticamente la razón entre sus masas permanece constante. Se interpreta entonces, que la acción gravitatoria no distingue entre actuar sobre un cuerpo más masivo que otro, debido a que, en cada cuerpo, la relación entre masa inercial y gravitacional siempre es igual. Según Janssen (2013) esto se ha comprobado experimentalmente y por ende representa una constante universal.

Por último, la anterior explicación pese a dar razón de la equivalencia entre masa inercial y gravitacional y además de tener sustento experimental, no proporciona una descripción física de este suceso, lo cual se consigue con el principio de equivalencia de relatividad general.

2.3. Noción de campo gravitacional

Acerca de la noción de campo gravitacional, de forma análoga a la idea de campo eléctrico que proporciona una explicación sustentada de la acción a distancia entre cargas eléctricas, la gravedad de un cuerpo masivo resulta más factible de entender, cuando se interpreta como un campo gravitacional. El cual, en el marco de la gravedad clásica es representado por un campo vectorial de fuerzas presente en el espacio circundante al cuerpo masivo que lo produce y cuyas líneas de campo convergen hacia el centro de masa del mismo, de modo que, sobre cualquier masa próxima a este espacio actúa una fuerza de atracción descrita por la ley de gravitación universal, produciéndose, a su vez, un movimiento orbital factible de describirse por las leyes de Kepler. Adicionalmente, a cada punto de este espacio se le asocia una intensidad de campo gravitacional g que disminuye con el cuadrado de la distancia. Por otro lado, en relatividad general, el campo gravitacional de un cuerpo masivo se corresponde con la curvatura que este ocasiona en el espacio y es representado por un campo tensorial, por lo que, el movimiento de cualquier cuerpo en su proximidad está determinado por la geometría de esta curvatura espacial.

2.4. El inicio de la relatividad generalizada

Fue en 1907 cuando Einstein concibió la idea que le permitió iniciar la edificación de la relatividad generalizada y a la cual se refirió como “la idea más feliz de mi vida”, sintetizada en el principio de equivalencia de relatividad general, teoría cuya formulación definitiva tuvo lugar en 1915 (Hacyan, 2020). En la misma puso de manifiesto un hecho nunca antes concebido en la mente, la percepción de un observador en caída es indistinguible a la de un observador que flota en reposo en un espacio sin gravedad, si se considera el movimiento de caída, la ausencia de peso genera la sensación de ingravidez, la cual, de no ser por el rozamiento del aire con el cuerpo convencería a cualquier observador de que se halla en una región espacial sin gravedad. Fue esta idea la que permitió entrelazar marcos acelerados por la gravedad con marcos inerciales, posibilitando así la incorporación del fenómeno gravitacional en la relatividad espacial.

Cabe precisar que esta cohesión solamente es válida para marcos acelerados que ocupan reducidas porciones de espacio en las que el campo gravitacional tiende a ser homogéneo, es decir, donde su magnitud permanece constante, en un escenario de este tipo es donde la gravedad y sus efectos son inapreciables para un observador en caída, aun cuando se realicen experimentos físicos (Gómez, 2019). Por otro lado, en extensas regiones de espacio el campo gravitacional es inhomogeneo, su magnitud varía de un punto a otro, por consiguiente, un cuerpo de gran tamaño o sistema de referencia que ocupa una gran extensión de espacio se verá afectado por los efectos de la gravedad que a tal escala no pasarán desapercibidos, efectos de marea o aparición de distancias relativas entre cuerpos separados por una gran distancia revelarán la presencia de gravedad (Schiller, 2020).

2.5. Principio de equivalencia

De acuerdo con la física clásica, el reposo es equivalente a movimiento uniforme y no hay forma alguna de hallar diferencia entre ambos estados de movimiento, ni siquiera por medio de experimentos físicos¹. Noción clásica que es refinada por el principio de equivalencia de relatividad general, que sienta la idea de que el reposo además de ser indistinguible del movimiento uniforme, también lo es del movimiento acelerado de caída (Schiller, 2020). Un observador que

¹Idea que da origen a la noción de marco de referencia inercial, concebido indistintamente en reposo o movimiento uniforme.

cae desde la estratosfera con facilidad podría convencerse de esto, en tal región de la atmósfera el aire es extremadamente tenue, por tanto, el rozamiento entre las escasas partículas de aire y el cuerpo es imperceptible, por lo que, a pesar de la gran velocidad de caída que aumenta uniformemente, el observador se percibe a sí mismo en completo reposo, lo cual implica que un marco acelerado por la gravedad puede llegar a ser considerado como un marco inercial.

Según lo anterior, es posible señalar que la relatividad general surge al reflexionar en una de las nociones básicas consolidadas en los tiempos de Galileo y Newton, la cual, Einstein tomó y refinó al descubrir que también podía extenderse para el caso de observadores en caída. Esta idea, sintetizada en el principio de equivalencia de relatividad general abre paso a una nueva visión de la gravedad que supera teórica y experimentalmente a la visión clásica, pero que a su vez la recupera en determinada situación límite, cuando el campo gravitacional no es intenso.

A continuación, se exponen reflexivamente dos versiones del principio de equivalencia que conjuntamente dan origen a las principales ideas y predicciones de la teoría, como lo son, la gravedad como consecuencia de la curvatura del espacio, fuerzas gravitacionales ficticias, curvatura de la luz por gravedad, efecto Doppler gravitacional, dilatación gravitacional del tiempo, entre otras. En la primera versión se expone que cualquier observador en caída, en el minúsculo espacio local que ocupa puede considerarse así mismo en reposo, lo cual conlleva a que puedan considerarse marcos inerciales bajo influencia gravitatoria. En la segunda versión se plantea que la noción clásica de fuerza gravitacional se corresponde con una fuerza ficticia, cuya existencia física es relativa y depende del marco de referencia en consideración, noción que proporciona una explicación sólida de la equivalencia entre masa inercial y gravitacional, que supera físicamente la visión clásica.

2.5.1. Equivalencia entre marcos inerciales y acelerados

Con base en la exposición del principio de equivalencia de relatividad general por parte de Janssen (2013) y Ramos (2018) se expone la siguiente descripción del mismo, la percepción de un observador en un reducido marco en caída es indistinguible a la de un observador en un marco inercial, no es posible a través de experimentos físicos hallar diferencia alguna entre ambos escenarios, estableciéndose así una relación de equivalencia entre observadores en caída e inerciales (véase la ilustración 1).

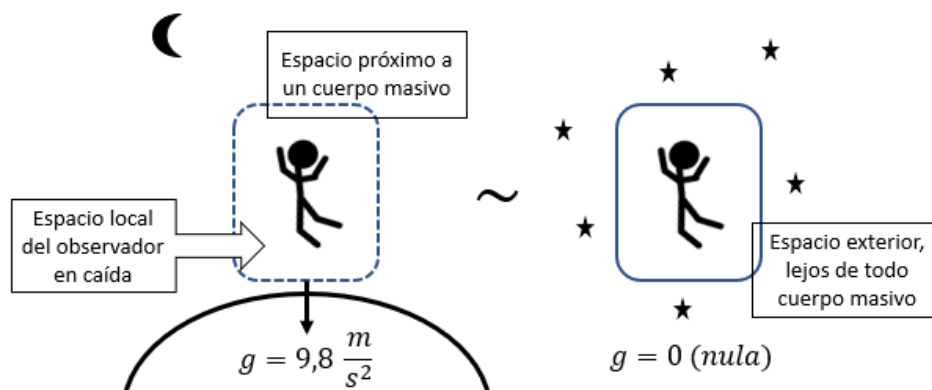


Ilustración 1. Equivalencia entre la percepción de un observador en caída y un observador inercial en ausencia de gravedad. Elaboración propia (2022)

<https://copitarxives.fisica.unam.mx/LT0001ES/LT0001ES.html>

Para Schiller (2020) esto lo pudo constatar Joseph Kittinger (1928 – 2022), antiguo piloto de la fuerza aérea estadounidense quien en agosto de 1960 se dejó caer desde una capsula de globo elevada a una altura de 31,3 km, altitud en la cual el aire atmosférico es extremadamente sutil e imperceptible, tanto así, que según el relato de Kittinger durante el primer minuto de su caída se sintió flotando en reposo, tal como un observador inercial, sorprendido por la vivencia tuvo que dirigir su mirada hacia el globo que lo había transportado para convencerse de que estaba alejándose de este. Pese al aparente reposo que percibió, caía hacia la superficie terrestre a una velocidad aproximada de 988 km/h, no fue hasta que empezó adentrarse en las capas de aire más denso que sintió el movimiento.

La vivencia de Kittinger confirma la equivalencia entre reposo y movimiento acelerado, únicamente válida en regiones puntuales del espacio en las que la intensidad de campo gravitacional se mantiene constante, desde el punto de vista de la relatividad general, donde la geometría curva del espacio es imperceptible, correspondiéndose con la de un espacio plano en el que la relatividad especial toma validez y en el cual los efectos del campo gravitacional como la aparición de distancias relativas producto de los efectos de marea, resultan ser nulos. En efecto, un marco en caída es equivalente a un marco inercial siempre y cuando sus dimensiones se correspondan con las de un diminuto punto del gigantesco espacio circundante a un cuerpo masivo.

Lo anterior es análogo a la percepción que las personas tenemos de la superficie terrestre que percibimos plana, cuando en realidad es una superficie curva correspondiente a la de una esfera achatada en los polos, cuya curvatura únicamente es posible apreciar si se consigue observar desde

un marco de referencia que permita apreciar una extensa escala de esta, por ejemplo, desde la ventana de un avión que vuela a una altura de 10 a 15 km sobre el suelo terrestre, se consigue tener un extenso rango de visión de la superficie del planeta, siendo posible apreciar su curvatura. Más aún en transbordadores espaciales que al alcanzar una mayor altura, posibilitan ver una inmensa escala de la superficie curva del planeta. En efecto, en una pequeña escala como a la que estamos acostumbrados la tierra es plana, pero al observar a gran escala, se puede apreciar su curvatura.

2.5.1.1. Justificación del principio de equivalencia

Un panorama más clarificador de cómo el principio de equivalencia posibilita la relación entre marcos acelerados en caída e inerciales, se consigue al reflexionar sobre el siguiente experimento mental, una habitación que cae por la acción del campo gravitacional terrestre junto con dos observadores en su interior; considerando que el rozamiento con el aire atmosférico es nulo, y que debido a lo minúsculo del espacio delimitado por esta, el campo gravitacional dentro de la habitación es homogéneo, es de prever que todo lo que hay en su interior se precipite al suelo terrestre a una misma velocidad, de modo que, los observadores además de sentir ausencia de gravedad al no sentir su propio peso, se perciben en un aparente estado de reposo.

Al hacer experimentos físicos, los resultados corresponden con los que se apreciaría en el interior de una nave interestelar que se halla en el espacio sideral, lejos de toda gran masa. Según la relatividad general, la trayectoria de movimiento de los cuerpos está determinada por la geometría espacial, que es curva en presencia de distribuciones de masa y energía (cuerpos masivos), y plana en su ausencia, entonces, de existir la nave interestelar referida, debido a su lejanía con cuerpos masivos, se movería con velocidad constante a lo largo de una trayectoria rectilínea propia de un espacio plano; por lo cual, de conformidad con el principio de equivalencia, al ser indistinguible la vivencia de los observadores en la habitación con la de los tripulantes de la nave, puede entonces considerarse que según su percepción, su marco se mueve con velocidad constante a lo largo de una trayectoria rectilínea, siendo esto indicio de que están en un espacio sin curvatura, lejos de toda gran masa; no obstante, la realidad es que se mueven a lo largo de una curva geodésica (recta de menor longitud entre dos puntos de una superficie curva) en un espacio con curvatura que desde su marco de referencia es imposible apreciar, implicando esto que en una pequeña escala del espacio, como la delimitada por el ascensor en caída, un marco acelerado sea equivalente a un marco inercial, en donde la curvatura del espacio circundante a un cuerpo masivo

es imperceptible al igual que sus efectos, dicho de otra forma, el campo gravitacional y sus efectos no se hacen manifiestos.

2.5.1.2. Noción general del principio de equivalencia

De acuerdo con las ecuaciones de campo de relatividad general, el espacio, comparable a un material extremadamente flexible y a su vez dúctil, adquiere una geometría curva por la presencia de cuerpos masivos. Pese a esta curvatura espacial, también denominada campo gravitacional, en cada región puntual de la misma puede considerarse que existe un marco de referencia localmente inercial en el cual las leyes de la física pueden describirse con la relatividad especial (Gómez, 2018). En efecto, un marco en caída es equivalente a un marco inercial únicamente si sus dimensiones se corresponden con las de un pequeño punto en el espacio, en tal escenario, la curvatura del espacio es imperceptible, es decir, la gravedad y sus efectos no se manifiestan ni aun a través de experimentos físicos.

El hecho de que la curvatura espacial no sea perceptible en regiones puntuales de un espacio con geometría curva es lo que posibilita concebir marcos inerciales bajo la acción de un campo gravitacional. No obstante, si se considera un marco en caída cuyas dimensiones abarcan una extensa región del espacio, se hace posible la distinción entre marco inercial y acelerado. En un marco de este tipo, el campo gravitacional y sus efectos son perceptibles; los efectos de marea incidirán sobre el mismo develando así la curvatura espacial (Schiller, 2020).

2.5.2. Equivalencia entre gravedad y aceleración

La segunda versión del principio de equivalencia enuncia que la percepción de un observador en un marco uniformemente acelerado es indistinguible a la de un observador inercial en un marco que se halla en presencia de un campo gravitacional, es decir, que reposa sobre la superficie sólida de un cuerpo masivo (véase la ilustración 2), ambos escenarios son equivalentes y no es posible hallar distinción alguna entre estos, ni siquiera por medio de experimentos físicos (Janssen, 2013).

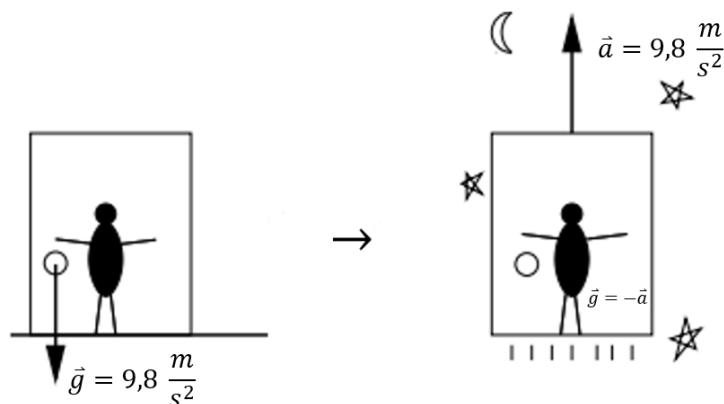


Ilustración 2 Equivalencia entre la percepción de un observador en un marco en reposo sobre la superficie terrestre y un observador en el interior de un marco que acelera en el espacio sideral a razón de $9,8 \frac{m}{s^2}$. Tomado y modificado de teoría de relatividad general universidad de Granada, Janssen, 2013
<https://www.ugr.es/~bjanssen/text/BertJanssen-RelatividadGeneral.pdf>

Para esclarecer lo anterior, se considera una nave interestelar que acelera en el espacio sideral a razón de $9,8 \frac{m}{s^2}$, producto de esta aceleración, los tripulantes perciben un campo gravitacional $\vec{g} = -\vec{a}$ que los mantiene a ellos y a todos los objetos en la nave atraídos hacia el suelo de la misma, por lo que, independientemente de la actividad que se realice, su percepción no difiere con la de observadores que estén sobre la superficie terrestre; podrían dar un brinco, poner una báscula en el suelo para medir su peso o el de cualquier objeto, realizar algún experimento físico, pese a esto, no hay diferencia alguna de la vivencia en tierra. Al brincar, se desciende momentáneamente al suelo, en la medición del peso, la báscula arroja el mismo valor que en tierra, a su vez, en experimentos de caída libre, objetos de distinto tamaño y masa que se sueltan desde una misma altura, llegan simultáneamente al suelo, validando así la equivalencia entre masa inercial y gravitacional. En efecto, a pesar de que la nave está retirada de cuerpos masivos, los observadores en su interior perciben la presencia de un campo gravitacional cuya intensidad pueden incluso medir, obteniendo un valor de $9,8 \frac{m}{s^2}$, percepción que es debida al movimiento acelerado de la nave.

2.5.2.1. Fuerza de atracción gravitacional y peso

El anterior escenario derivado del principio de equivalencia conduce a un replanteamiento de la noción de fuerza de atracción gravitacional, a la que se atribuye la interacción gravitatoria entre dos cuerpos, como la Tierra y la Luna o el Sol y la Tierra, a su vez, de acuerdo con la visión clásica, es por esta fuerza que todo cuerpo u objeto se mantiene sujeto a la superficie terrestre y

por la cual tiene lugar el movimiento de caída libre, de modo que, si se elevan objetos a determinada altura y se sueltan, por la acción de esta fuerza nuevamente son atraídos hacia el suelo a lo largo de una trayectoria rectilínea con una aceleración medible de $-9,8 \text{ m/s}^2$.

Si en un marco que acelera a razón de $9,8 \text{ m/s}^2$ en un espacio vacío, se considera el movimiento de caída que describen dos objetos de distinto tamaño y masa que se sueltan desde una misma altura, observado por los tripulantes en la nave (observadores locales) y un observador externo propiamente inercial, es decir, en completa ausencia de campo gravitacional, de acuerdo con Janssen (2013), mientras que los observadores locales visualizan a los objetos describir trayectorias rectilíneas hasta alcanzar al mismo tiempo el suelo, desde su punto de vista, producto de la fuerza de atracción gravitacional que perciben, la cual acelera a todo cuerpo u objeto hacia el suelo a razón de $-9,8 \text{ m/s}^2$; desde el punto de vista del observador externo, una vez que los objetos se sueltan, pierden contacto con el marco acelerado, de modo que su aceleración se anula y prontamente son alcanzados por el suelo que acelera hacia ellos a razón de $9,8 \text{ m/s}^2$. Es así como, para el observador externo, el movimiento que visualizan los observadores locales es atribuible a la inercia, más no a la acción de una fuerza de atracción gravitacional que desde su punto de vista no existe. Una vez que los objetos pierden contacto con el marco acelerado, conservan la velocidad alcanzada en los últimos instantes por este, manteniéndose así a una misma posición respecto al suelo de la nave hasta finalmente ser alcanzados por este.

Según lo anterior, la existencia de la fuerza de atracción gravitacional es relativa y su aparición depende del marco de referencia elegido, es así como, además de la acción de una fuerza, también es posible contemplar la idea de que aquellos cuerpos u objetos que pierden contacto con la superficie terrestre son alcanzados por esta que acelera hacia estos a razón de $9,8 \text{ m/s}^2$ (Janssen, 2013). Según esta versión del principio de equivalencia, la fuerza de gravedad aparece dependiendo del sistema de coordenadas en consideración, surge entonces la idea de que se corresponda con una fuerza ficticia que permite a los observadores terrestres al igual que a los observadores en la nave, dar razón de su percepción; los tripulantes de la nave, a pesar de que no están en presencia de un campo gravitacional, perciben el campo gravitacional $\vec{g} = -\vec{a}$ (véase la ilustración 2) debido al movimiento uniforme acelerado de su sistema de referencia y consecuentemente invocan la fuerza de atracción gravitacional para poder explicar su percepción

y el resultado de sus experimentos físicos, siendo la aceleración de su sistema responsable de su sensación de peso.

Capítulo 3. Pruebas de la relatividad general

Uno de los requisitos que debe cumplir una teoría científica para ser validada en la comunidad científica, exige que sus predicciones teóricas sean factibles de probarse experimentalmente, es decir que, a partir de experimentos físicos sea posible medir y corroborar aquello que se propone. De modo que, es posible decir que la relatividad general cumplió satisfactoriamente este requerimiento, además de su éxito en la exacta descripción del movimiento de Mercurio, sus principales predicciones derivadas del principio de equivalencia, como la deflexión de la luz en un campo gravitacional, el corrimiento al rojo gravitacional y la dilatación del tiempo, entre otras, también fueron verificadas.

Es gracias a estos aciertos, que las ideas que promueve la teoría acerca de la gravitación como lo son la curvatura o distorsión de la geometría espacial en presencia de distribuciones de masa y energía, la gravedad como consecuencia del movimiento en un espacio con curvatura, entre otras, han sido acogidas desde el siglo XX hasta la época actual en la interpretación del fenómeno gravitacional, el cual, para campos gravitacionales débiles como los presentes en el sistema solar, puede ser descrito según el punto de vista clásico y moderno. Cabe recordar, que en campos débiles la relatividad general recupera a la gravedad newtoniana, no obstante, en campos gravitacionales intensos la gravedad clásica pierde por completo validez y debe abrir paso a la gravedad moderna, por ejemplo, en el espacio próximo al sol la gravedad newtoniana debe someterse a correcciones relativistas para describir de forma acertada el movimiento de Mercurio (Hacyan, 2019).

Por otro lado, con el propósito de sentar un contexto aproximado de cómo la gravedad moderna superó teóricamente a la gravedad newtoniana, la exposición que se presenta a continuación inicia con la descripción del fenómeno de precesión apsidal presente en órbitas planetarias y satelitales, y responsable de que estas giren entorno al sol; hecho que únicamente es apreciable en la órbita de Mercurio y el cual solo puede ser descrito con exactitud por la relatividad general. Posteriormente, se describe la deducción de las principales predicciones de la relatividad general a partir del principio de equivalencia y se relata sin profundizar en detalles como tuvo lugar su confirmación experimental. Por último, se dan a conocer los nombres de algunos efectos relativistas también probados experimentalmente y se mencionan algunas predicciones de la

relatividad general obtenidas como soluciones de las ecuaciones de campo, particularmente, los hoyos negros y las ondas gravitacionales.

3.1. Precesión apsidal

De acuerdo con la gravedad newtoniana, la órbita que describen planetas y satélites se corresponde con una elipse estática con el sol en uno de sus focos, siendo el perihelio el punto de la órbita que más cerca está del sol y el afelio el más retirado de este, no obstante, el movimiento orbital de Mercurio revela que las órbitas no son estáticas, con el tiempo giran gradualmente alrededor del sol. En mecánica celeste, este fenómeno se conoce como precesión apsidal y consiste en la rotación gradual del eje mayor de la órbita elíptica en torno al cuerpo central de atracción, eje también denominado línea de ápsides, que se corresponde con una recta trazada entre el punto de la elipse más cercano y alejado del llamado cuerpo central, denominados periapsis y Apoapsis respectivamente (véase la ilustración 3).

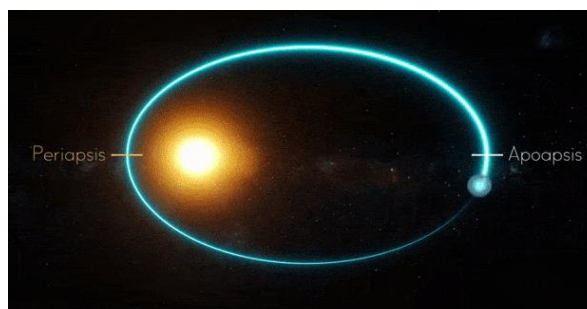


Ilustración 3 Periapsis y Apoapsis en una órbita elíptica. Tomado de ORBITALEOS (figura 6), Ezquerro, 2020, <https://www.orbitaleos.com/orbital-mechanics-1/>

En efecto, a medida que un planeta avanza a través de su órbita, el perihelio de esta se desplaza lentamente arrastrando consigo la elipse, ocasionando con esto que gire lentamente en torno al sol (véase la ilustración 4), movimiento que es extremadamente lento, siendo el de la órbita de Mercurio el más prominente del sistema solar y factible de observar al igual que el de la órbita lunar, en las órbitas de los demás cuerpos celestes del sistema solar es imperceptible, dando lugar a órbitas aparentemente estáticas descritas por la gravedad clásica (Duran, 2019).

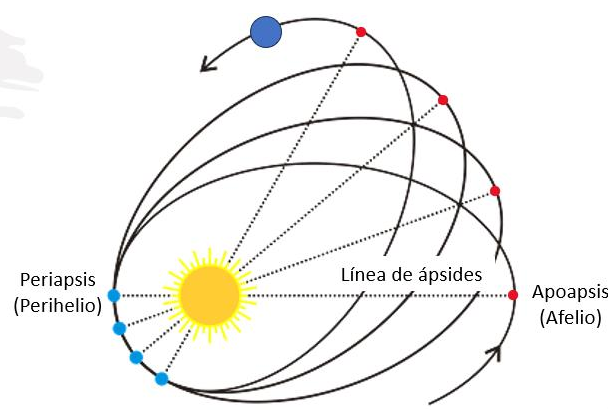


Ilustración 4 Precesión apsidal: desplazamiento del perihelio y rotación de la órbita en torno al sol. Tomado y modificado de Astrobites en español (figura 2), Clifford, 2018, <https://astrobites.org/2018/10/31/bepicolombo-despega-en-busca-de-einstein/>

3.1.1. Precesión apsidal de la órbita de mercurio

A finales del siglo XIX, el peculiar movimiento orbital de Mercurio en comparación con el de los demás planetas y su discrepancia con la gravedad clásica, obligan a poner en cuestionamiento la teoría. Aun así, cabe resaltar que en el tiempo que antecede a lo anterior, la gravedad de Newton ejerció un importante papel en la caracterización de los distintos astros del sistema solar, permitió el reconocimiento de sus órbitas, permitió conocer la magnitud de sus masas, además de la intensidad de su campo gravitacional y posición en la bóveda celeste, siendo uno de sus logros más significativos el descubrimiento del planeta Neptuno, precedido exclusivamente por cálculos matemáticos (O'Connor y Robertson, 1996).

En lo que concierne al hallazgo de Neptuno, este procedió de cierta discrepancia detectada entre la trayectoria orbital seguida por Urano y la órbita predicha por los cálculos que se desviaba significativamente de la observada. Acerca de esto, el astrónomo inglés John Couch Adams (1819 - 1892) y el astrofísico italiano Urbain Le Verrier (1811 - 1877), plantearon que quizá la diferencia podía ser atribuida a la influencia gravitacional de un planeta desconocido que no se había contemplado en los cálculos y estaría jalando gravitacionalmente a Urano, alterando así su órbita, por lo cual, con el propósito de probar su planteamiento, durante algún tiempo observaron de forma minuciosa a Urano y efectuaron nuevamente cálculos en los que se tuvo en cuenta la influencia gravitacional del supuesto planeta, finalmente, consiguieron predecir su posición en la bóveda celeste. Subsecuentemente, en septiembre de 1846 el astrónomo alemán Johann Gottfried Galle

(1812 - 1910) conociendo los cálculos de Le Verrier, apuntó su telescopio a las coordenadas predichas y allí encontró a Neptuno (O'Connor y Robertson, 1996).

Con relación a Mercurio, su movimiento no concordaba con los cálculos teóricos de la teoría clásica, a medida que el planeta avanza en su órbita, su perihelio se desplaza muy lentamente arrastrando consigo la elipse, consecuentemente, su órbita gira levemente en torno al sol, lo cual contradice la noción clásica de órbitas estáticas, aun así, dentro de los esfuerzos para esclarecer el asunto, se efectuaron cálculos en los que se tuvo en cuenta todas las posibles perturbaciones debidas a la influencia gravitacional de los planetas interiores y exteriores, no obstante, ningún cálculo concordó con el movimiento del planeta, lo cual terminó inquietando considerablemente a algunos científicos, quienes, al no encontrar respuestas sólidas, consideraron la necesidad de refinar o modificar la teoría (Villatoro, 2010). Sin embargo, para esclarecer el asunto habría que esperar hasta la publicación de la relatividad general en 1916, teoría que era necesario poner a prueba, fue entonces la precesión del perihelio de Mercurio la oportunidad propicia para ello, los cálculos relativistas describieron con muy buena exactitud el movimiento orbital del planeta, el cual se atribuye a la prominente curvatura que el sol ocasiona en el espacio por el que este se mueve.

Cabe señalar que desde mediados del siglo XIX era conocido el avance del perihelio de Mercurio, no obstante, suele atribuirse a Le Verrier codescubridor de Neptuno como el primero en percatarse de la diferencia entre los resultados arrojados por los cálculos teóricos y lo observado (Villatoro, 2010). Según los registros empíricos, el perihelio del planeta avanzaba 574 arcosegundos por siglo, lo cual difería significativamente de los cálculos que predecían un avance de 531 arcosegundos por siglo, dando lugar a una diferencia de 43 arcosegundos (Duran, 2019). Para hallar la razón de esta diferencia, se plantearon distintas hipótesis en las que se consideró la existencia de un cinturón de asteroides entre el sol y el planeta, un planeta llamado Vulcano que podría anteceder a Mercurio pero que jamás apareció en los telescopios, la presencia de distribuciones de materia cósmica en torno al sol, siendo esta última, la hipótesis que perduró hasta la aparición y puesta a prueba de la relatividad general (Villatoro, 2010).

Finalmente, cuando Einstein abordó el problema aplicó correcciones relativistas al potencial newtoniano y encontró un desplazamiento adicional del perihelio de 43 arcosegundos

por siglo, que al ser adicionado a la predicción clásica de 531 arcosegundos, se ajustaba a las observaciones con una extraordinaria exactitud (véase la ilustración 5), prediciendo así una corrección relativista a la primera ley de Kepler, según la cual, la trayectoria orbital de los planetas se corresponde con una elipse estática, no obstante, la trayectoria orbital de Mercurio demuestra que se corresponde con una elipse que gira lentamente en el plano de la órbita a medida que el perihelio avanza cierto ángulo de precesión apsidal a lo largo de una circunferencia invisible que rodea al sol (véase la ilustración 6), siendo esto consecuencia de moverse en un espacio con curvatura (Janssen, 2013).

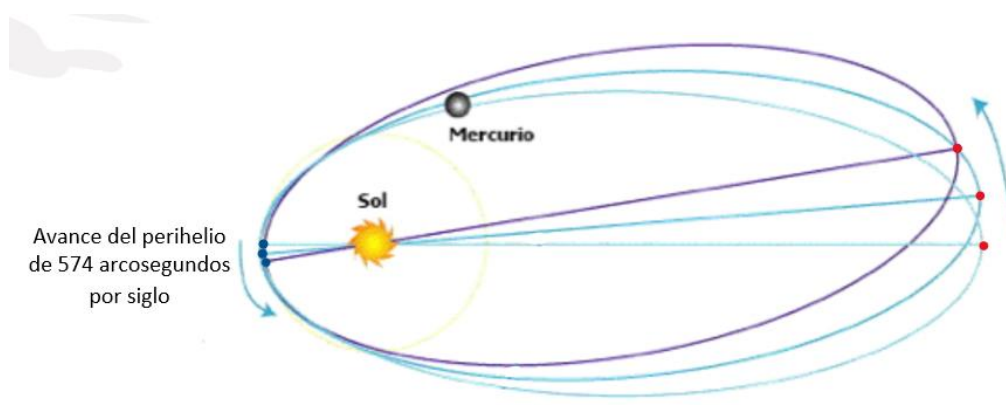


Ilustración 5 Precesión apsidal de la órbita de Mercurio: el perihelio de la órbita avanza 574 arcosegundos por siglo, haciendo girar la órbita levemente en torno al sol. Tomado y modificado de Blog de física, Arrieta, 2016, <https://aarrietaj.wordpress.com/2016/05/14/10-1-curiosidades-sobre-mercurio-que-todo-el-mundo-deberia-conocer/>

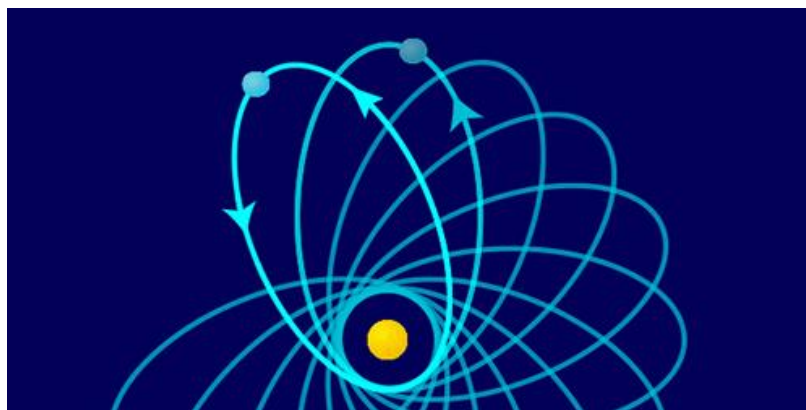


Ilustración 6. Rastros del movimiento de precesión apsidal al cabo miles de millones de años. Tomado de Physical Review Letters, Wright, 2018, <https://physics.aps.org/articles/v11/s54>

Esta precesión absidal es apreciable en la órbita de Mercurio debido a su excentricidad y proximidad al sol, con lo cual, el movimiento orbital del planeta es el más afectado por el campo gravitacional de la estrella al moverse a través del espacio con la curvatura más prominente del sistema solar. Pese a esto, la medida del ángulo de precesión apsidal de la órbita de Mercurio demuestra que la curvatura espacial debida al sol es considerablemente débil en comparación con la de otros objetos estelares. Por último, en lo que concierne a la precesión apsidal en los demás planetas, es demasiado lenta, a lo que se suma el hecho de que sus excentricidades sean leves, por lo cual, sus órbitas son casi circulares y estacionarias.

Lo anterior representó la primera prueba exitosa a la que se sometió la relatividad general, aun así, describir de forma exacta la precesión de la órbita de Mercurio no era razón suficiente para validar la reciente teoría, se requería probar una de sus principales predicciones, la curvatura de la luz.

3.2. Deflexión gravitacional de la luz

La denominada curvatura o deflexión gravitacional de la luz es una de las consecuencias del principio de equivalencia, específicamente de su segunda versión anteriormente expuesta, de modo que, si se considera un fotón o rayo de luz, proveniente de un marco inercial que se halla en el espacio exterior, atravesando el interior de un marco que avanza en el espacio vacío con una aceleración constante de $9,8 \frac{m}{s^2}$. Producto de esta aceleración, los observadores locales ven que el haz de luz, al atravesar el marco, experimenta un leve cambio de dirección hacia el campo gravitacional g que perciben, por lo cual, su punto final de incidencia en el marco está ubicado a una distancia vertical h por debajo del nivel por el cual ingresó al mismo (véase la ilustración 7). En conclusión, para los observadores en el marco acelerado, la luz es afectada por la gravedad g , por lo que su trayectoria se curva al atravesar el campo gravitacional de su marco, lo cual implica que la curvatura del espacio cambia la dirección en la cual se propaga la luz (Janssen, 2013). Por el contrario, desde el punto de vista de un observador inercial externo, cuando el rayo de luz atraviesa el marco acelerado, a causa del movimiento acelerado del mismo, su incidencia en la pared opuesta es un poco más abajo del nivel inicial por donde ingresó, desde su marco de referencia no existe campo gravitacional y la luz que atraviesa el marco acelerado describe una trayectoria rectilínea (véase la ilustración 7).

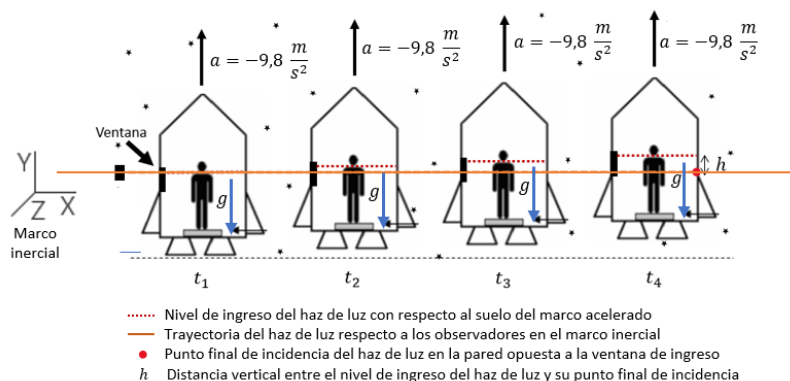


Ilustración 7 Trayectoria de un haz de luz que atraviesa un marco uniformemente acelerado según los observadores de un marco de referencia inercial. Elaboración propia (2022)

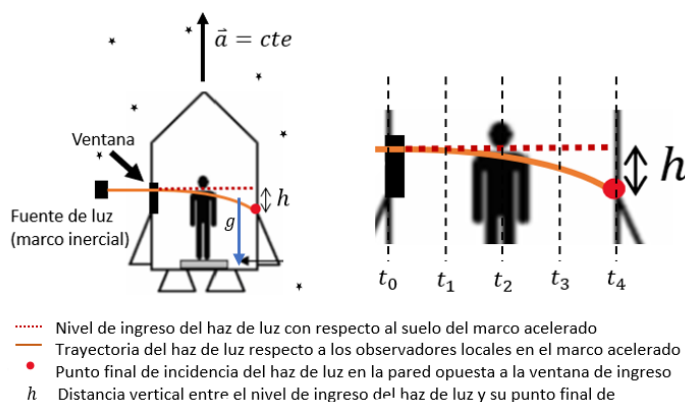


Ilustración 8 Trayectoria de un haz de luz que atraviesa un marco uniformemente acelerado según los observadores locales en el marco. Elaboración propia (2022)

La deflexión o curvatura de la luz en presencia de un campo gravitatorio, es una de las ideas revolucionarias que incorpora la relatividad general en la descripción del fenómeno gravitacional, según la cual, la gravedad también actúa sobre partículas sin masa, como lo son, los fotones de luz; noción que es inconcebible en la gravedad clásica, donde la acción gravitacional tiene lugar únicamente entre cuerpos masivos.

Al igual que con los cuerpos masivos, que se mueven a través del espacio según la curvatura del mismo, la luz, al propagarse también obedece a la geometría espacial, por lo cual, en un espacio sin curvatura, lejos de toda fuente de campo, describe una trayectoria rectilínea y en regiones especiales próximas a un cuerpo masivo, experimenta cambios de dirección como consecuencia de la curvatura espacial. Lo anterior, además de probarse experimentalmente en el eclipse de 1919, como se verá a continuación, también se corrobora en observaciones astronómicas, en las que

puede apreciarse el efecto de lente gravitacional; cuando los haces de luz provenientes de una estrella o galaxia pasan por el espacio próximo a un gran objeto estelar, por la influencia del campo de gravedad que atraviesan cambian su dirección de propagación, por lo tanto, un observador en la tierra verá a la estrella o galaxia en una posición del espacio que no se corresponde con la real (véase la ilustración 9).

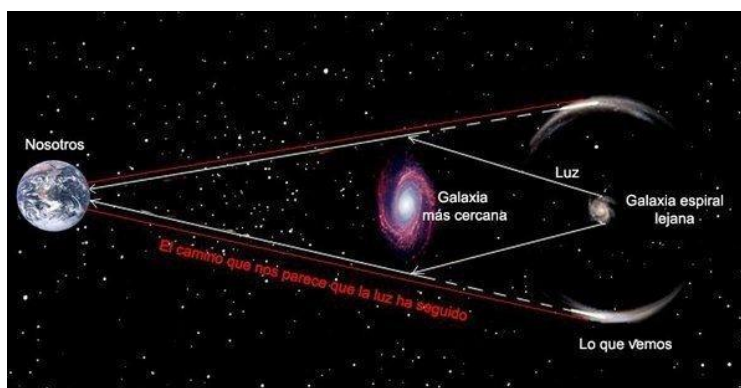


Ilustración 9 Lente gravitacional: cuando la luz proveniente de la galaxia lejana atraviesa el espacio próximo a la galaxia más cercana a la tierra, debido al campo gravitacional de esta última, es decir, a la curvatura de su espacio, experimenta una deflexión; cambia su dirección de propagación, de modo que, en la tierra se observa imágenes de la galaxia en posiciones del espacio que no se corresponden con su posición real. Tomado de obstinados navegantes en océanos de incertidumbre, Ramajuan, 2014, <https://ramanujan25449.blogspot.com/2014/02/lentes-gravitacionales-los-telescopios.html>

3.2.1. Confirmación experimental de la curvatura de la luz

Para la prueba experimental de la curvatura de la luz, Einstein planteó que la trayectoria de un rayo de luz proveniente de cualquier estrella que, con respecto a la Tierra, estuviese posicionada detrás del sol, al atravesar el espacio próximo a este, experimentaría un cambio en su dirección de propagación debido al campo gravitacional solar, por lo cual, si se consiguiera tapar el sol; desde la tierra se vería una imagen de la estrella en una posición del espacio que no se corresponde con su posición real (véase la ilustración 10), siendo esto prueba de que la trayectoria de la luz también se es influenciada por la geometría espacial (Schiller, 2020). En efecto, si un observador en tierra examina la posición de la estrella en el cielo, en ausencia de sol y cuando este atraviesa su posición, notará que cuando el sol transita por la misma posición en la que se encuentra la estrella; esta aparentemente cambia de posición, no obstante, en realidad la estrella no cambia de posición, a causa de la curvatura que su luz experimenta al pasar cerca del sol, lo que se ve en tierra no es la estrella en sí misma, es una imagen de esta (véase la ilustración 10).

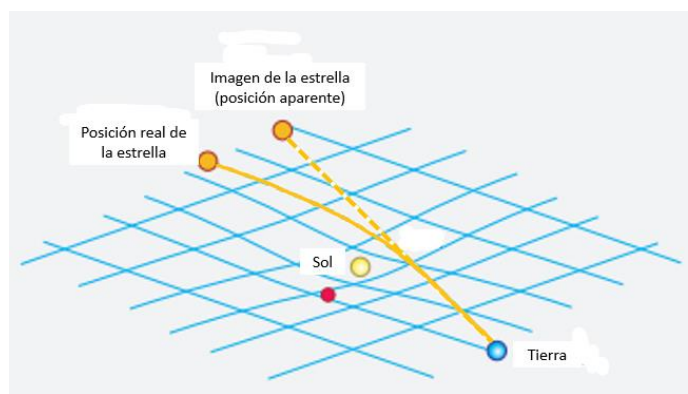


Ilustración 10 Deflexión o curvatura de la luz de una estrella al atravesar el campo gravitacional del sol, como resultado de esto, los observadores terrestres ven una imagen de la estrella en una posición del espacio que no se corresponde con su posición real. Tomado y modificado de Relatividad y Cosmología (figura 55), Schiller, 2020

Cabe señalar que para medir el ángulo α de deflexión de la luz (véase la ilustración 11), se debe comparar la posición real de la estrella con la posición que ocupa su imagen, de modo que, necesariamente debe taparse el sol, lo cual únicamente es posible en un eclipse solar; una vez tapado, deben tomarse fotografías de las estrellas visibles en los bordes del disco solar, más allá de su radio, posteriormente al comparar estas fotos con fotografías de las mismas estrellas en ausencia del sol, se hace evidente el cambio de posición de las mismas, con base en la comparación se hace posible la medición de α .

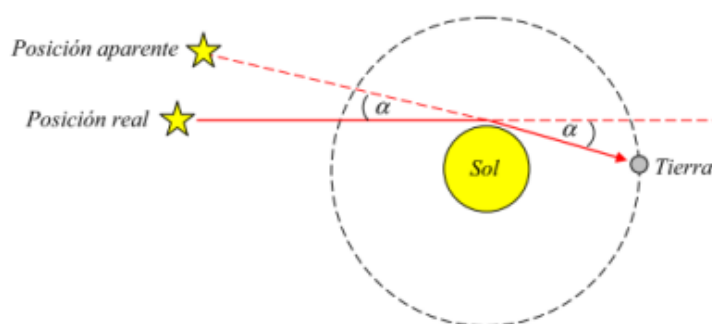


Ilustración 11 Ángulo de deflexión de la luz. Tomado de Relatividad y cosmología, Schiller, 2020

En correspondencia con lo anterior, según los cálculos de Einstein, el ángulo de deflexión para las imágenes estelares en el borde solar debería rondar en 1,75 arcosegundos, no obstante, con base en la gravitación universal también se predijo un valor en virtud de la naturaleza dual de la luz, que en algunos experimentos se comporta como onda y en otros como partícula, por lo cual, si se considera un fotón masivo de luz estelar, cuya masa tiende a cero, al pasar muy cerca del sol

es atraído gravitacionalmente por este, por lo cual, su trayectoria se curva 0.87 arcosegundos, sorprendentemente la mitad del valor predicho por Einstein (Sánchez, 2015).

Finalmente, en mayo de 1919, con el propósito de medir la curvatura de la luz en virtud del eclipse lunar del 19 de mayo de 1919 los astrónomos británicos Arthur Eddington (1882 - 1944) y Frank Watson (1868 - 1939) dirigieron dos expediciones al hemisferio sur, un equipo fue a Brasil y el otro a la isla de Puerto Príncipe en África. El equipo en Brasil midió ángulos de deflexión entre 1,9 y 0,86 arcosegundos para las imágenes estelares en el borde solar y el equipo en África tomó medidas entre 1,31 y 1,91 arcosegundos, después de analizar los datos registrados, el mismo año se hicieron públicos los resultados de las expediciones, los cuales se inclinaban hacia la predicción relativista que predecía un ángulo de deflexión de 1,75 arcosegundos (Jansen, 2013)

3.3. Efecto Doppler gravitacional

A parte de la curvatura de la luz, otra de las consecuencias del principio de equivalencia es el efecto Doppler gravitacional o también denominado corrimiento al rojo gravitacional. En efecto, si en el interior de un marco acelerado, los observadores locales ubican en el suelo un dispositivo que emite pulsos de luz regulares hacia el techo del mismo, en donde se encuentra cierto dispositivo que recepta estos pulsos, un observador inercial externo nota que, en el instante en el que son emitidos los pulsos la velocidad del marco es menor a la velocidad del mismo una vez que los pulsos son detectados por el dispositivo en el techo, en efecto, en el tiempo entre la emisión de los pulsos en el suelo y su detección en el techo, el marco ha adquirido una velocidad adicional, de modo que, existe una velocidad relativa entre la fuente de emisión de los pulsos y el receptor en el techo. Fenómeno ondulatorio que se conoce como efecto Doppler, en el cual, dependiendo de la velocidad relativa entre la fuente de emisión y el receptor, los pulsos de onda provenientes de la fuente inciden sobre el receptor con un aumento o reducción de su frecuencia. En la situación en cuestión, cuando los pulsos inciden sobre el detector en el techo, debido a que el marco alcanza una velocidad cada vez mayor que supera a la velocidad con la que son emitidos, inciden sobre el detector con una frecuencia menor, por lo cual, según el espectro electromagnético, la luz detectada tendrá un corrimiento hacia el rojo (Janssen, 2013).

Cabe precisar que, acerca de la anterior situación, para los observadores locales, la reducción de la frecuencia de los pulsos de onda detectados en el techo es debida a la influencia

del campo gravitacional que perciben, lo cual implica que, a medida que la luz se aleja de un campo gravitacional, es decir, de su fuente de emisión, experimentado un corrimiento hacia el rojo; en el caso contrario, en cercanía a un campo gravitacional la luz experimenta un corrimiento hacia el azul, es decir, su frecuencia aumenta (Schiller, 2020).

3.3.1. Confirmación experimental del efecto Doppler gravitacional

Por otro lado, entre 1960 y 1964 los físicos norteamericanos Robert Pound (1919-2010) y Glen Rebka (1931-2015) en la universidad de Harvard consiguieron probar experimentalmente el corrimiento al rojo gravitacional a través de un experimento en el que se monitoreo la frecuencia de rayos gamma que se hacían subir por una torre de aproximadamente 20 metros de altura, se comparaba entonces sus frecuencias en el suelo con las detectadas en la parte superior de la torre, lo cual reveló una ligera variación de la misma; los fotones que ascendían, llegaban a lo más alto de la torre con una frecuencia menor a la de los fotones que se emitían en el suelo, diferencia que se ajustaba a los cálculos teóricos con muy buena exactitud (Janssen, 2013).

Cabe precisar que, según Janssen (2013), para esta confirmación experimental se tomó como base el fenómeno de emisión y absorción de fotones, por lo que, en la base de la torre se dispuso una fuente de átomos excitados encargados de emitir rayos gamma hacia lo alto de esta, lugar donde se encontraba el detector, que se correspondía con átomos del mismo tipo, pero en su estado base. Así que, cuando los fotones provenientes de la fuente arribaban a los átomos en el detector no los conseguían excitar debido a la pérdida de energía que experimentaban al atravesar el campo gravitacional, correspondiendo esto con una reducción de su frecuencia, lo cual confirmaba la predicción relativista. Cuando la luz se mueve en contra de un campo gravitacional, pierden energía a causa de este, reduciéndose así su frecuencia, conocido esto como corrimiento al rojo gravitacional, sí, por el contrario, se mueve en la dirección del campo gana energía, aumentando la frecuencia, dando lugar con ello a un corrimiento hacia el azul.

3.3.2. Dilatación gravitacional del tiempo

La predicción relativista de dilatación gravitacional del tiempo surge como una consecuencia del efecto Doppler gravitacional, por lo cual, se toma nuevamente en consideración un marco que acelera en el espacio vacío a razón de $-9,8 \frac{m}{s^2}$, en el cual, por esta ocasión los observadores locales ubican en el techo y suelo del marco relojes de iguales características que

para la medición del tiempo emiten pulsos de igual frecuencia. No obstante, cuando los observadores comparan en instrumentos de detección locales la frecuencia de los pulsos provenientes de ambos relojes, se dan cuenta que la frecuencia de los pulsos del reloj en el techo es mayor que la de los pulsos del reloj en el suelo, implicando esto, que el tiempo fluye más lento en el suelo y más rápido en el techo.

Para un observador inercial externo, el hecho de que los pulsos del reloj en el suelo tengan menor frecuencia que los del reloj en el techo, se debe al efecto Doppler, como la emisión de estos pulsos tiene lugar en la dirección en la que acelera el marco, una vez que son emitidos, debido a la aceleración, el marco alcanza una velocidad mayor, por lo cual, los pulsos tardaran un poco más de tiempo en alcanzar los instrumentos de detección. Por el contrario, en el caso de los pulsos del reloj en el techo, al ser emitidos en dirección contraria al avance del marco, tardan menos tiempo en incidir sobre los instrumentos de detección, una vez que son emitidos, el marco prontamente los alcanza al acelerar hacia estos a razón de $-9,8 \frac{m}{s^2}$.

Según lo anterior y en virtud del principio de equivalencia, el tiempo corre más lento entre más cerca se esté de la fuente de campo gravitacional y más rápido entre más lejos se esté de la misma, o equivalentemente, a mayor curvatura del espacio más lento es flujo del tiempo y a menor curvatura más rápido es el flujo del mismo. Predicción que se confirmó experimentalmente en 1976, año en el que se lanzó el Gravity Probe A, un satélite que orbitó la tierra a 10.000 kilómetros de altura, equipado con un dispositivo para medir el tiempo a esa altitud, en la cual, según cálculos, un reloj debería correr más rápido que en la superficie terrestre (Janssen, 2013). Al comparar las mediciones de tiempo en el Gravity con las de un dispositivo igual, pero en tierra, se encontró que la variación en el ritmo de los relojes concordaba con las predicciones teóricas.

3.4. Otros test de la relatividad general

Cabe aclarar que, además del éxito de la relatividad general en la descripción precisa del movimiento de Mercurio y en la confirmación experimental de las principales predicciones derivadas del principio de equivalencia, como la deflexión gravitacional de la luz, el corrimiento al rojo y la dilatación gravitacional del tiempo, son más las predicciones que se derivan de teoría, cuya confirmación experimental también ha sido exitosa, algunas de estas son: el efecto Shapiro o también denominado retraso temporal gravitacional deducido en 1964 por parte del astrofísico

Irwin Shapiro (1929 – 94 años), el efecto geodésico propuesto en 1916 por el astrofísico Willem de Sitter (1872 - 1934), el efecto Lense Thirring deducido en 1918 por los físicos austriacos Josef Lense (1890 - 1985) y Hans Thirring (1888 - 1976). No obstante, acerca del éxito de la teoría en la confirmación experimental de sus efectos relativistas, Janssen (2013) en su libro de texto aclara lo siguiente:

Todos estos test (...) han sido hechos dentro del sistema solar y por lo tanto (..) solo han podido comprobar el régimen de campo débil de la teoría (...) donde las correcciones a la teoría newtoniana son pequeñas. Mucho más difícil (...) es comprobar la teoría en situaciones donde el campo gravitatorio es muy fuerte. (P.185):

Por otro lado, cabe señalar que algunas de las predicciones más emblemáticas de la teoría, como los hoyos negros y las ondas gravitacionales, surgieron como soluciones de las ecuaciones de campo de Einstein. Acerca de los hoyos negros, las soluciones exactas halladas por el astrofísico Karl Schwarzschild (1873 - 1916) en 1915 y por el matemático Roy Kerr (1934 – 89 años) en 1963, entre otras del mismo tipo, predijeron la existencia en el universo de estos asombrosos objetos estelares. En cuanto a las ondas gravitacionales, aparecen como soluciones aproximadas de las ecuaciones de Einstein al ser aplicadas a un campo gravitacional débil como el generado por el sol, conduciendo a la predicción de su existencia por parte del mismo Einstein entre 1916 y 1918.

Posteriormente, los físicos soviéticos Lev Landau (1908 - 1968) y Yevgueni Lifshitz (1915 - 1985) dedujeron que un sistema estelar binario liberaría energía en forma de radiación gravitacional, lo cual se manifestaría en una progresiva reducción del periodo orbital del mismo; aporte que fue determinante en la primera detección indirecta de este tipo de radiación en virtud del pulsar PSR B1913+19 y en las primeras detecciones directas que tuvieron lugar en la segunda década del siglo XXI (Hacyan, 2020).

Capítulo 4. Ondas gravitacionales

Antes de la aproximación de onda gravitacional hallada por Einstein en 1916, según Hacyan (2019) el astrofísico Pierre-Simón Laplace (1799 - 1814) y el matemático Henri Poincaré (1854 - 1912), pudieron haber aludido a este tipo de radiación en un intento por explicar cierta desviación de la órbita lunar respecto a la predicha por la gravedad clásica. Según Laplace, podría ser resultado de pequeñas irregularidades del movimiento terrestre, por lo cual, ante cierta variación del mismo, la señal del cambio tardaría cierto tiempo en incidir sobre la Luna, produciéndose así la desviación detectada.

Cabe precisar, como se expuso en capítulos anteriores, que la ley de gravitación universal establece que, un cuerpo masivo ejerce una fuerza de atracción sobre otro que esté en su cercanía, cuya intensidad se atenúa con el cuadrado de la distancia que los separa. Según la misma teoría, esta acción ocurre de forma instantánea, aún así, para Laplace también era válido pensar qué, al moverse uno de los dos cuerpos, la señal del cambio tardaría cierto tiempo en llegar al otro, implicando esto la existencia de una velocidad finita de propagación para la interacción gravitacional (Hacyan, 2019). Para afianzar su idea, Laplace efectuó cálculos, y desconcertantemente, encontró un valor superior a la velocidad de la luz. Transcurrido un siglo, Poincaré argumentó qué, así como la interacción electromagnética se propaga en el vacío a una velocidad fija, podría considerarse que, de existir una velocidad de propagación para la interacción gravitatoria, su magnitud debería ser equivalente o muy próxima a la velocidad de la luz, no obstante, ninguno de los dos logró precisar cómo la interacción gravitacional podría tener una velocidad de transmisión.

Quizá sin saberlo, es posible que Laplace y Poincaré se hayan referido de forma indirecta a las ondas de gravedad, que pueden ser concebidas como leves perturbaciones de la geometría espacial producidas por la dinámica entre materia, energía y espacio, las cuales viajan por el espacio a la velocidad de la luz y generan leves e imperceptibles efectos de marea en la materia que encuentran a su paso. En efecto, así como se producen las perturbaciones u ondas mecánicas, que surgen cuando cierta región de un medio elástico es perturbada. Análogamente, los cuerpos masivos distorsionan levemente la geometría del espacio por el cual transitan, produciéndose así leves perturbaciones de la geometría espacial que se alejan a la mayor velocidad posible, c , y que

a su paso ocasionan cambios de longitud en las dimensiones de la materia. Cabe recordar que, según la relatividad general, el espacio no se corresponde con un lugar fijo, independiente y carente de propiedades en el cual se aloja toda la materia existente, más bien se asemeja a una estructura dinámica que interactúa con la materia y energía presente en el mismo (Schiller, 2020).

Por otro lado, con la publicación de la teoría de relatividad general y sus ecuaciones de campo en 1915, pese a la complejidad inherente a las mismas, en el mismo año aparecieron algunas soluciones, particularmente, Karl Schwarzschild (1873 - 1916) encontró una solución exacta que dependía de un solo parámetro, la masa, y describía la configuración geométrica espacial o campo gravitacional que un cuerpo masivo completamente esférico similar a una estrella, ocasionaría en el espacio; solución en la que se contempló que para el caso de una gran masa comprimida en una esfera de radio inferior al radio de Schwarzschild, el campo gravitacional sería tan intenso que retendría la luz, impidiéndole escapar, resultando así un hoyo negro. En correspondencia con este hallazgo, tiempo después, en 1964 Roy Kerr (1934 – 89 años) halló una nueva solución exacta, esta vez, un hoyo negro rotante definido por dos parámetros, masa y momento angular, según la cual, al anularse el segundo parámetro, se recupera el hoyo negro de Schwarzschild. Son estos objetos estelares predichos por las ecuaciones de campo, los que al ser considerados no de forma singular sino en parejas, es decir, como sistemas estelares binarios de hoyos negros, se reconocen como una de las principales fuentes de radiación gravitacional detectable en tierra, de hecho, la primera detección de ondas gravitacionales registrada y las subsecuentes se correspondieron con pulsos de onda provenientes de sistemas de este tipo cuyos hoyos habían colisionado (Sintes y Sorazu, 2017).

De acuerdo con lo expuesto por distintas fuentes que abordan de una forma descriptiva las distintas aportaciones teóricas que resultaron cruciales en el avance de la predicción de onda gravitacional en el siglo XX, a continuación, se describe cómo tuvo lugar la primera detección indirecta de este tipo de radiación, los efectos previstos de estas ondas en la materia, las ideas que alentaron la construcción de los primeros detectores, hasta la consideración de la técnica de interferometría laser, la primera detección directa por parte del observatorio estadounidense Ligo. Posteriormente, se procura caracterizar las ondas gravitacionales con base en sus similitudes y diferencias con las ondas electromagnéticas, adicionalmente, con base en el espectro de radiación

gravitacional, se clasifican los distintos tipos de radiación gravitacional que se prevé existen, según su frecuencia, longitud de onda y fuentes de emisión.

4.1. Predicción de ondas gravitacionales

Acercas de la predicción de ondas gravitacionales, se reconoce que fue entre 1915 y 1918 cuando Einstein encontró algunas soluciones aproximadas de las ecuaciones de campo, cuya forma se correspondía con la de una onda, hallazgo que él mismo publicó a través de un artículo, poniendo así en consideración la existencia de radiación gravitacional. En el artículo Einstein dedujo tres tipos de onda, longitudinales-longitudinales, longitudinales-transversales y transversales-transversales, según Einstein, los dos primeros no transportan energía, pero el tercero si, concluyendo entonces que las ondas gravitacionales podrían tener realidad física y se corresponden con vibraciones de la geometría espacial perpendiculares a su velocidad de propagación (Schiller, 2020). Pese a esto, en la época, pensar en ondas de naturaleza gravitacional que viajan en la inmensidad del cosmos resultaba ser un asunto extraño que suscitaba varios cuestionamientos que posiblemente no podrían ser respondidos, ¿Cómo es su naturaleza y fuentes de origen? ¿Cómo se propagan a través del cosmos? y de existir ¿Cuáles serían sus efectos sobre la materia?, además ¿De qué manera podrían ser detectadas en la tierra?, entre otros (Hacyan, 2019).

Según Gamboa y Méndez (2020) Einstein llegó a esta aproximación al analizar la aplicabilidad de sus ecuaciones en campos débiles similares al campo de gravedad del sol o de algunas estrellas vecinas al sistema solar, donde la curvatura de la geometría espacial es débil. Aserción que es respaldada por Hacyan (2019), quien expone que analizando campos débiles fue que Einstein consiguió reducir sus complicadas ecuaciones de campo no lineales, a una expresión simple que proporcionó correcciones relativistas a la ley de gravitación universal y adicionalmente condujo a la aproximación de onda. Cabe señalar que el propio Einstein llegó a dudar de la existencia de estas ondas, al ser la gravedad la más débil de las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza, las ondas de gravedad resultan ser extremadamente débiles y su efecto en la materia imperceptible; pese a esto en 1937 publicó un artículo titulado “sobre las ondas gravitacionales” en el cual dejó en entredicho el asunto, quedando la idea a disposición de discusiones e investigaciones que no llegó a conocer.

Por otro lado, en lo que concierne al desarrollo teórico del tópico durante el siglo XX, como se expone en la siguiente sección, fue determinante el trabajo de los físicos soviéticos Landau y Lifshitz quienes dedujeron una fórmula que describía la emisión de energía en forma de ondas gravitacionales por parte de un sistema cuádrupolar de masas, el hallazgo del pulsar binario PSRB 1913+16 cuyo seguimiento por parte de Russell Hulse y Joseph Taylor, por un periodo de aproximadamente 30 años confirmó de forma indirecta la existencia de estas ondas. Así mismo, el avance tecnológico que posibilitó el planteamiento de técnicas de detección cada vez más precisas que conllevaron a la construcción de los detectores actuales, en los cuales se ha conseguido detectar pulsos de ondas gravitacionales en su mayoría provenientes de colisiones entre hoyos negros y pulsares binarios. Gracias a esto, en la actualidad se tiene una fuerte convicción de que la estructura espacial además de ser dúctil, capaz de soportar deformaciones extremas sin llegar a quebrarse, también puede vibrar, así como vibra un metal que resuena (Schiller, 2020).

4.2. Detección indirecta de ondas gravitacionales

A pesar de que el asunto de las ondas gravitacionales, desde su publicación en 1918, fue controversial para distintos físicos quienes no concebían su existencia, a mediados del siglo XX emergieron importantes aportaciones teóricas que respaldaron la idea. Entre los académicos que se puede considerar hicieron los aportes más relevantes están los físicos soviéticos Lev Landau (1908 - 1968) y Evgueny Lifshitz (1915 - 1985), el físico británico Felix Pirani (1928 - 2015), el cosmólogo austriaco Hermann Bondi (1919 - 2005), el físico británico Ibor Robinson (1923 - 2016) y el físico matemático polonés Andrzej Trautman, entre otros. Es de destacar el trabajo realizado por Landau y Lifshitz, quienes al replicar los cálculos de Einstein obtuvieron una fórmula que describe teóricamente la emisión de energía como ondas de gravedad por parte de una configuración cuádrupolar de masas (Hacyan, 2019); la cual, al aplicarse a un sistema estelar binario, es decir, dos estrellas que orbitan en torno a un centro de masa común, predice un decaimiento del periodo orbital del mismo, es decir, una reducción orbital del sistema debido a la emisión de energía capaz de hacer vibrar la geometría espacial (Weisberg y Taylor, 2005).

4.2.1. Pulsar de Hulse y Taylor

De acuerdo con lo descrito por Hacyan (2019) y Schiller (2020), en conformidad con el hallazgo teórico de Landau y Lifshitz, en 1974 los astrofísicos estadounidenses Joseph Taylor y

Russell Hulse haciendo uso del radiotelescopio Arecibo en Puerto Rico, descubrieron el pulsar PSR 1913+16, el cual emitía pulsos de radio extremadamente regulares, cuyas señales se detectaban cada 59 milisegundos (ms), siendo esto indicio de que aparentemente se correspondía con una singular estrella de neutrones que giraba a gran rapidez 17 veces por segundo. No obstante, después de rigurosos seguimientos del tiempo existente entre una pulsación detectada y otra sucesiva, se percataron de que el periodo de llegada de las pulsaciones no era fijo, sino que variaba ligeramente con respecto a los 59 ms, durante algunas horas aumentaba mientras en otras disminuía, siendo 3 segundos la máxima diferencia; los aumentos y las disminuciones tenían lugar de forma breve y sistemática, repitiéndose de forma regular cada 7,75 horas².

Para Hulse y Taylor, estas ligeras variaciones en el tiempo de llegada de los pulsos revelaban la presencia de otro cuerpo masivo que debía mantener interacción con el pulsar, minuciosos análisis de los datos registrados indicaron que efectivamente se trataba de un sistema estelar binario conformado por una pareja de estrellas de neutrones, cada una con una masa de aproximadamente 1,4 masas solares, una apuntaba sus pulsaciones hacia la tierra mientras que la otra en una dirección distinta; el pulsar detectado y su compañera completaban su respectiva órbita en torno a su centro de masa común cada 7,75 horas, de modo que el pulsar se acercaba y alejaba de la tierra una distancia aproximada de 900.000 kilómetros, correspondientes a la distancia que debía recorrer una de sus pulsaciones en los tres segundos de máxima diferencia (Schiller, 2020).

Posterioros datos revelaron que el periodo orbital de PSR 1913+16 se reducía progresivamente unos 7,6 ms por año terrestre, indicio de que el sistema estaría perdiendo energía y en consecuencia ambos cuerpos estarían acercándose una al otro alrededor de 3,5 metros por año; hecho que coincidía con lo predicho por la fórmula cuadrupolar de Landau y Lifshitz, por lo cual, el sistema debería emitir ondas gravitacionales (véase la ilustración 12). Subsecuentes estudios, se enfocan en medir la diferencia en el tiempo de llegada de las pulsaciones a causa de efectos gravitacionales, es decir, cuando las estrellas pasan por su periastro, región orbital en la que la distancia entre ambos cuerpos es mínima y la intensidad gravitacional es mayor, el tiempo del periodo orbital presentaba ligeras reducciones (Hacyan, 2019).

² La emisión de radiación electromagnética a intervalos regulares resulta ser una propiedad de gran utilidad en los púlsares, facilita el seguimiento de la órbita que describen, lo cual se hace midiendo ligeros cambios en los tiempos de llegada de los pulsos (Schiller, pág.176, 2020).

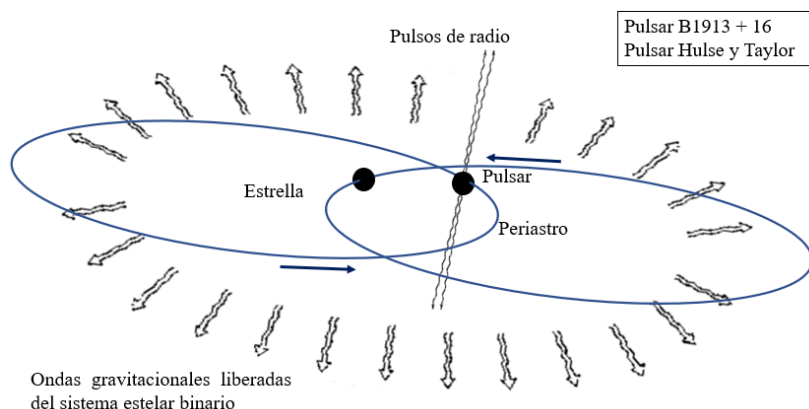


Ilustración 12 Reducción del periodo orbital del pulsar PSR 1913+16 por la liberación de energía en forma de radiación gravitacional. Elaboración propia (2022)

4.2.2. Decaimiento del periodo orbital de PSR 1913+16

Durante aproximadamente treinta años se midió el decaimiento del periodo orbital cuando las estrellas transitaban por el periastro, a su vez, con la fórmula de Landau y Lifshitz se efectuaron cálculos para la emisión de energía en forma de radiación gravitacional, con el fin de predecir el decaimiento orbital del sistema para el mismo periodo de tiempo de las mediciones, finalmente los datos predichos y las mediciones registradas se anexaron en un gráfico (véase la ilustración 13); al comparar los gráficos, se encontró que las medidas tomadas directamente del pulsar concordaban con muy buena exactitud con los datos obtenidos en la predicción (Weisberg y Taylor, 2005). Lo cual representó la primera detección indirecta de ondas gravitacionales, con esto, los indicios de su existencia empezaban a ser irrefutables.

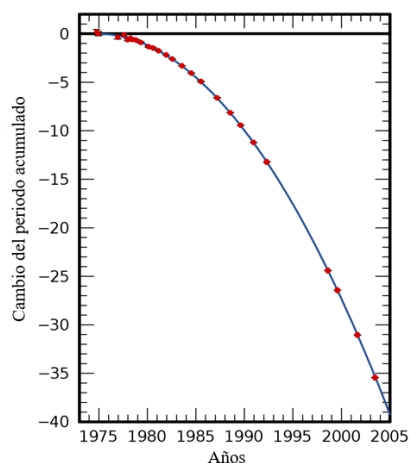


Ilustración 13 Decaimiento orbital de PSR 1913 + 16. Los puntos en la gráfica se corresponden con las medidas que se tomaron del cambio en el periodo orbital, a lo largo de casi 30 años, cada vez que las estrellas transitaban por el

periastro; en efecto, verticalmente se registra la reducción de tiempo en segundos del periodo orbital a medida que transcurren los años. Entre tanto que, la parábola corresponde a la predicción teórica del decaimiento del periodo orbital de un sistema de iguales características que según la relatividad general emite ondas gravitacionales, Tomado de Schiller (2020).

4.3. Fuentes de ondas gravitacionales

Según la relatividad general, espacio, materia y energía interactúan, por lo cual, en ausencia de estas últimas la geometría espacial carece de curvatura alguna, sin embargo, se distorsiona o curva al alojar distribuciones de masa y energía. Siendo la trayectoria de movimiento de todo cuerpo en el espacio determinada por la geometría del mismo, la cual, a su vez experimenta leves perturbaciones por el movimiento de los cuerpos que aloja. En efecto, así como una embarcación produce ondas mecánicas en el agua al transitar por un lago, que transportan energía capaz de ocasionar efectos sobre la materia que encuentren a su paso, análogamente, todo cuerpo que transita por el espacio, a su paso produce perturbaciones en la geometría espacial, es decir, ondas de gravedad que se extienden a través del mismo, no obstante, debido a su naturaleza gravitacional, son prácticamente imperceptibles.

4.3.1. Efectos de las ondas gravitacionales

Según Schiller (2020), así como una partícula eléctrica acelerada emite ondas electromagnéticas, se prevé que las masas aceleradas producen ligeras perturbaciones en la geometría espacial, es decir, ondas gravitacionales que a medida que se alejan de su fuente a la velocidad de la luz, comprimen y estiran el espacio, influyendo esto sobre la materia alojada en el mismo. Por ejemplo, si se considera un anillo en el espacio vacío, al paso de una onda gravitacional la distancia entre las partículas que lo componen variará ligeramente, puede que se alejen verticalmente, entre tanto que horizontalmente se acerquen, o equivalentemente, mientras el anillo se estira en una dirección en la otra se comprime. En resumen, las perturbaciones de la geometría espacial se manifiestan en la materia como leves cambios de distancia entre las partículas que la componen, hecho que se traduce en una simultánea compresión y expansión de la misma en sus diferentes dimensiones; si se comprime o estira el espacio, cualquier objeto alojado en el mismo se comprimirá en una dimensión, mientras que en otra se estirará.

Cabe precisar que, a diferencia de las ondas electromagnéticas que inciden exclusivamente sobre partículas cargadas, las ondas gravitacionales interactúan con todas las formas de materia, no obstante, la interacción es extremadamente débil, tanto así, que los efectos de las ondas

provenientes del sistema solar sobre la materia en tierra son casi inexistentes, aún más, aquellos debidos a ondas provenientes de las profundidades del universo. De hecho, si en la vía láctea tuviera lugar una explosión estelar, es decir, una supernova, las ondas de gravedad provenientes de la explosión perturbarían la geometría espacial del sistema solar de forma exageradamente leve; su efecto sobre la distancia total entre el Sol y la Tierra sería insignificante, se reduciría en tan solo el diámetro de un átomo de hidrógeno durante unos cuantos milisegundos (Chávez, 1996). Siendo el efecto aún menor en distancias más cortas, por ejemplo, para una distancia de diez kilómetros la reducción sería de tan solo algunas milésimas del diámetro de un protón. Pese a esto, se estima que la radiación gravitacional producto de eventos estelares violentos como choques entre estrellas de neutrones y hoyos negros, transporta suficiente energía para generar cambios de distancia perceptibles por los detectores actuales.

Según cálculos computacionales en relatividad numérica, en colisiones de este tipo, que se presumen frecuentes en el universo, se origina un pulso de onda gravitacional relativamente intenso cuyo efecto en la materia es medible, el cual, a su vez es antecedido por un breve periodo de pulsos que a pesar de ser más débiles también son detectables; atribuidos al movimiento en espiral de ambos cuerpos girando aceleradamente uno alrededor del otro antes de colisionar. Sin embargo, para detectar un pulso de este tipo se requiere tecnología altamente sofisticada que permita detectar variaciones de distancia en el orden de algunas diezmillonésimas o cienmillonésimas partes del diámetro de un protón (Schiller, 2020).

4.3.2. Fuentes de ondas gravitacionales detectables en Tierra

Por otro lado, acerca de las fuentes de radiación gravitacional detectable en Tierra, cabe precisar que estas han sido identificadas a través de cálculos computacionales en relatividad numérica, que es una rama de la relatividad general que además de desempeñar un importante papel en la búsqueda de posibles soluciones de las complicadas ecuaciones de Einstein a través de simulaciones numéricas, también ha permitido describir detalladamente cómo se produce una onda gravitacional e identificar aquellos eventos estelares en los que se producen los pulsos de onda más energéticos detectables en Tierra. Es gracias a esto que se ha conseguido describir de forma precisa como un sistema estelar formado por dos hoyos negros libera energía en forma de radiación gravitacional, acercándose gradualmente uno al otro en una espiral cada vez más estrecha hasta finalmente colisionar y producir un intenso pulso de radiación gravitacional que lleva consigo una

importante porción de energía del sistema, equivalente al 5% o más de la masa de los objetos en colisión (Hacyan, 2020).

4.4. Detección de ondas gravitacionales

Con la publicación de la fórmula cuadrupolar por parte de Landau y Lifshitz en 1952, que predice la existencia de ondas gravitacionales con un trasfondo más legible que la predicción inicial por parte de Einstein entre 1916 y 1918, según Hacyan (2020), la comunidad de científicos fieles a la relatividad general se dividió en dos, aquellos que apoyaban la existencia de estas ondas, creyendo particularmente en la fórmula cuadrupolar, pero quienes a su vez reconocían que, de existir tales ondas, serían difíciles de detectar, y los escépticos que no les atribuían realidad física, para quienes los avances teóricos del tópico se correspondían con formalismos matemáticos sin relación con procesos físicos reales.

Fue hasta 1957 que se presentó una salida viable de las discusiones teóricas; en aquel año tuvo lugar el congreso de Chapel Hill, al que acudieron varios expertos en relatividad general, incluido el físico británico Felix Pirani (1918 - 2015) quien exhibió una sugerente manera de medir la magnitud de un campo gravitacional en el marco de la TGR. En su exposición, propuso que la curvatura de la geometría espacial podría ser determinada al observar cómo varía la distancia relativa entre partículas que atraviesan un campo gravitacional, es decir, en virtud de efectos de marea, lo cual surtió efecto en los partidarios de la radiación gravitacional, para quienes la idea podría ser tomada como directriz para la detección de las controversiales ondas; si se considera un anillo de partículas flotando en el espacio vacío, al paso de una onda la distancia entre las partículas diametralmente opuestas debería variar (Cervantes, Galindo y Smoot, 2016).

Direccionado por la idea de Pirani, el ingeniero estadounidense Joseph Weber (1919 - 2000) quien había asistido al simposio en Chapel Hill, entre 1958 y 1965 construyó el primer detector de ondas gravitacionales (vea la ilustración 14), conformado por dos cilindros macizos de aluminio separados entre sí una distancia de 1000 kilómetros; cada cilindro estaba suspendido por cables en el vacío, de modo que se conseguían aislar de efectos acústicos, sismos, entre otros. Para la detección de las ondas, sus superficies se rodeaban por placas piezoeléctricas, cristales que a la más mínima variación de presión generan un voltaje abriendo paso a una pequeña corriente eléctrica. Así que, al paso de una onda gravitacional el diámetro de ambos cilindros oscilaría muy

levemente, generando pequeñas corrientes eléctricas en los cristales que revelarían el paso de la onda.



Ilustración 14 Uno de los primeros detectores de ondas gravitacionales, construido por el ingeniero James Weber en los años 60, colecciones especiales Universidad de Maryland, 2016, tomado de <https://www.eurekalert.org/news-releases/896438>

Una vez que se puso en funcionamiento el detector, a finales de la década del 60 Weber afirmó haber detectado señales atribuibles a ondas gravitacionales, detección a la que se sumarían posteriores hallazgos que resultaron de versiones mejoradas de su detector construidas por el mismo; no obstante, a pesar de haber reportado en repetidas ocasiones la detecciones de estas ondas, sus aparentes hallazgos nunca fueron aceptados por la comunidad científica, para quienes las supuestas señales detectadas serían indicio de que en la galaxia habría más energía en forma de radiación gravitacional que de luz.

4.4.1. Interferometría láser en la detección de ondas gravitacionales

Frente a la falta de resultados positivos con los detectores de diverso tipo, construidos en distintos laboratorios en todo el mundo, la atención se desvió hacia la técnica de interferometría láser cuyo principio de funcionamiento es el fenómeno de interferencia de la luz, característico de la naturaleza ondulatoria de la misma.

Según Cervantes, Galindo y Smoot (2016) desde los años 60 la idea de detectar ondas gravitacionales a través de la técnica de interferometría láser estuvo presente en la mente de algunos científicos e ingenieros, incluido el propio Weber. No obstante, no fue hasta los años 70 que se empezaron a construir los primeros prototipos, para lo cual se construyeron interferómetros del tipo Michelson y Morley, dispositivos en forma de L (véase la ilustración 15) que constan de una fuente de luz monocromática, es decir, de una sola frecuencia, un espejo reflectante

semitransparente denominado divisor de haz, dos espejos reflejantes y un detector de luz o fotodetector.

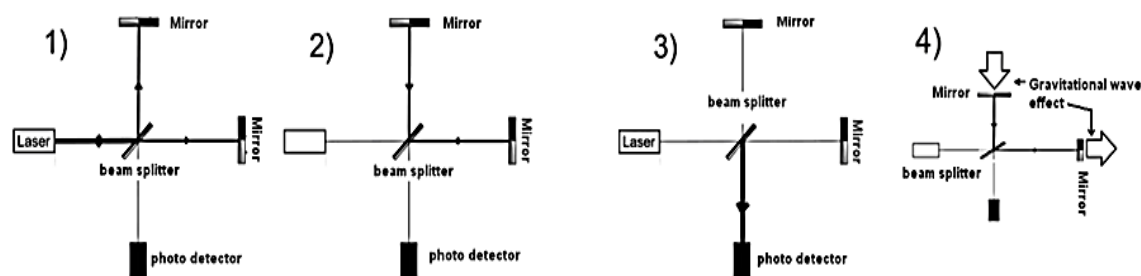


Ilustración 15 Esquema de funcionamiento de un interferómetro del tipo Michelson-Morley y efecto en la longitud de sus brazos por el paso de una onda gravitacional que atraviesa perpendicularmente el plano sobre el cual reposa. Tomado de, A Brief History of Gravitational Waves, 2016.

En un dispositivo de este tipo (véase la ilustración 15), el haz de luz procedente de una fuente de luz láser se hace incidir sobre un espejo denominado divisor de haz (beam splitter) que lo desdobra en dos haces que viajan a través de trayectorias distintas, perpendiculares entre sí y de igual longitud, denominadas brazos del interferómetro, en cuyos extremos se sitúa un espejo reflector (mirror), de modo que, cuando los haces de luz inciden sobre estos espejos, son reflejados hacia un mismo punto en el espejo divisor, lugar donde se superponen, resultando así un nuevo haz de luz que es reflejado hacia el fotodetector; sucede entonces que si por alguna causa externa la longitud de los brazos varía, por ejemplo, si la longitud de uno aumenta mientras que la del otro disminuye, los haces de luz recorrerán diferentes distancias, de modo que, retornarán al divisor de haz con una diferencia de tiempo, es decir, desfasados, por lo cual, al recombinarse darán lugar a un patrón de interferencia que puede corresponderse con el de una interferencia constructiva, si al encontrarse, están en fase o con un leve desfase, o destructiva si las crestas y valles de un haz coinciden exactamente con las del otro, en dado caso, la longitud de los brazos no fue afectada.

Lo anterior es funcional para la detección de ondas gravitacionales, una onda de este tipo que incide de forma perpendicular al plano terrestre en el que yace un interferómetro, provocará que la longitud de sus brazos cambie, de manera que, mientras uno se acorta el otro se alarga y viceversa, por lo cual, los haces de luz, al recorrer diferentes distancia se combinan en el divisor de haz con una diferencia de tiempo, es decir, se superponen en fase o desfase, originándose así en el haz de luz resultante un patrón de interferencia factible de asociarse a un pulso de onda gravitacional; en la siguiente imagen (ilustración 16) se resume de forma simplificada la idea

básica de funcionamiento de la técnica de interferometría láser aplicada a la detección de ondas gravitacionales por los laboratorios LIGO (Sintes y Sorazu, 2017).

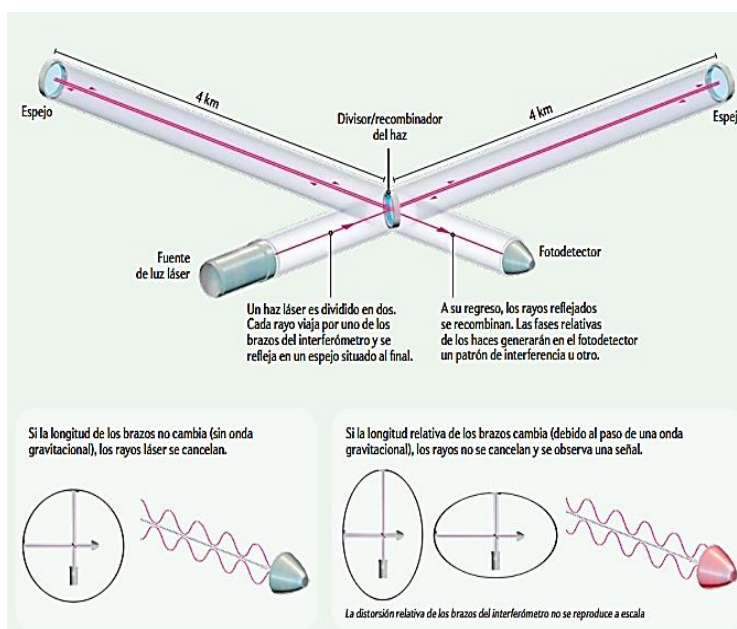


Ilustración 16 Idea básica de funcionamiento de los detectores de ondas gravitacionales Ligo. Tomado de, La observación de ondas gravitacionales con LIGO, Sintes y Sorazu, 2017.

Es preciso señalar que independientemente de los instrumentos de detección que se utilicen en tierra para detectar ondas gravitacionales, debido a su alta sensibilidad, siempre estarán expuestos al ruido de fondo, por lo que, no vibrarán únicamente por el paso de una onda gravitacional. Ondas mecánicas de diferente amplitud y frecuencia provenientes de microsismos, vehículos en tránsito, personas caminando u objetos que golpeen el suelo en la cercanía, serán percibidas por cualquier detector. Por esta razón, es necesario tener presente el rango de frecuencia característico de las ondas de ruido, cuyas frecuencias rondan los 40 o 50 Hertz que suele ser la frecuencia característica de vibración del suelo, para así identificar en qué rango de frecuencias es razonable buscar vibraciones de naturaleza gravitacional. Según Hacyan (2020) la detección de ondas gravitacionales es como tratar de escuchar una conversación susurrada en medio de una discoteca. Analogía en la que el detector sería cualquier persona que intenta escuchar la conversación susurrada de una pareja que esté en su cercanía, el ruido de fondo se correspondería con música a alto volumen, risas y conversaciones de las personas en un tono alto, entre tanto que, las ondas gravitacionales serían las leves ondas sonoras de la conversación susurrada.

Por otro lado, además de la clasificación de las frecuencias del ruido de fondo, que posibilita distinguir las vibraciones propiamente gravitacionales, para tener total certeza de que una vibración detectada se corresponde con una onda de naturaleza gravitacional, es imprescindible tener dos o más detectores separados entre sí por algunos miles de kilómetros, lo cual permite descartar aquellas vibraciones que se detectan en el rango de frecuencias de radiación gravitacional, pero cuyo origen es local; puesto que, una onda gravitacional que atraviese la tierra activará simultáneamente todos los detectores, sin importar la ubicación y distancia que exista entre estos.

4.5. Acerca del origen del proyecto Ligo

A pesar de que en los años setenta los primeros intentos por detectar ondas gravitacionales se confirieron a los cilindros masivos tipo Weber, en los años 60, la idea de utilizar interferometría láser para el mismo fin había rondado en la mente de los físicos soviéticos M.E. Gertsenshtein y V.I. Pustovoit, quienes, a pesar de exponer la idea por primera vez en un artículo publicado en 1963, no le dieron continuidad (Gonzales y Sintés, 2015). No fue hasta principios de los años 70 que la idea fue retomada por el físico Rainer Weiss (1932) quien en 1972 presentó un escrito para el Massachusetts Institute of Technology (Caltech), en el cual expuso que una potente luz láser de centenares de Watts capaz de reflejarse cientos de veces o más entre dos espejos cóncavos situados en los brazos de un interferómetro de Michelson y Morley, podría llegar a recorrer en el interior del mismo distancias equivalentes a centenares de kilómetros, posibilitando así una interferencia observable al paso de una onda gravitacional (Cervantes, Galindo y Smoot, 2016).

Posteriormente, entre 2010 y 2015, después de múltiples intentos fracasados, los detectores se sometieron a diferentes remodelaciones que mejoraron su tecnológica y las técnicas para aislar en un mayor grado el ruido de fondo, aumentando así su sensibilidad, esta segunda versión se denominó Advanced Ligo e inicio operaciones en septiembre del 2015, asombrosamente, el 14 de septiembre estando aun en periodos de prueba, ambos detectores percibieron simultáneamente una misma señal de onda que duro algunos milisegundos, el denominado evento GW150914, el cual, según cálculos rigurosos se correspondió con la onda gravitacional producida por una colisión de dos hoyos negros que se habrían precipitado mutuamente, uno hacia el otro, en una órbita cada vez más estrecha y rápida, hasta finalmente colisionar y fusionarse; produciendo una intensa ráfaga de

radiación gravitacional cuyo remanente atravesó la tierra en septiembre del 2015, después de haber viajado por el espacio alrededor de 1300 millones de años (Sintes y Sorazu, 2017).

Después de GW150914, los detectores Ligo siguieron registrando más detecciones de ondas gravitacionales, los eventos GW151223, GW170104, GW170817, este último fue captado simultáneamente el 17 agosto del 2017 en ambos detectores Ligo y en un tercer detector en Italia, Virgo avanzado (Arnauld, 2017). Acerca de GW170817, su recepción en los detectores fue la de más larga duración, de aproximadamente 100 segundos, señal que se correspondió con los pulsos de radiación gravitacional provenientes de una colisión de dos estrellas de neutrones en una galaxia situada a unos 140 millones de años luz; no obstante, el mismo día, el observatorio espacial Fermi captó una explosión de Rayos Gamma, por lo cual, con base en la señal detectada en los tres detectores se identificó la posición en el cielo de la fuente que había emitido las ondas gravitacionales, de modo que, una vez que se apuntaron los telescopios hacia la posición de la fuente, se pudo observar los resplandores aún visibles de la colisión (Hacyan, 2019).

4.6. Acerca de la caracterización de las ondas gravitacionales

En lo que concierne a la caracterización de las ondas gravitacionales, cabe señalar que comparten algunas características con las ondas electromagnéticas, viajan a la misma velocidad, ambas son transversales, por lo que, sus efectos sobre las respectivas partículas con las que interactúan son perpendiculares a su dirección de propagación, debido a esto, también se les asocia una polarización (Lazkoz y Valiente, 2003). Respecto a sus diferencias, sus frecuencias y longitudes de onda difieren notablemente, mientras que el rango de frecuencias de las ondas gravitacionales se prevé que está comprendido entre $10^{-16}Hz$ hasta 10^4Hz , el de las ondas electromagnéticas se encuentra entre 10^6Hz y $10^{20}Hz$, implicando esto que las ondas gravitacionales tengan longitudes de onda muchísimo más extensas.

Finalmente, así como la radiación electromagnética se clasifica según su frecuencia y longitud de onda, en lo que conocemos como el espectro electromagnético, análogamente, según Cervantes, Galindo y Smoot (2016) la radiación gravitacional se clasifica en tres tipos, en primer lugar, la radiación estocástica, que se corresponde con ondas de muy baja frecuencia, según estimaciones matemáticas, provenientes de la interacción gravitacional entre gigantescos agujeros negros en núcleos galácticos, sistemas estelares conformados por hoyos negros de muchas masas

solares, entre otros aun no modelados matemáticamente, cuyas longitudes de onda pueden estar comprendidas por decenas de años luz, e incluso alcanzar longitudes comparables a la escala del universo. En segundo lugar, la radiación gravitacional periódica, correspondiente a ondas gravitacionales con periodos más o menos regulares, emitidas por la interacción gravitacional entre sistemas estelares binarios que están lejos de fusionarse. En tercer lugar, radiación gravitacional impulsiva, que se corresponde con ráfagas intensas de radiación gravitacional emitidas por el acelerado movimiento en espiral de cuerpos extremadamente masivos y compactos, como hoyos negros o estrellas de neutrones, instantes antes colisionar y fusionarse, este tipo de radiación es la de mayor frecuencia, entre decenas de Hz hasta los KHz, y menor longitud de onda, la cual, en los últimos años ha sido detectada (Hacyan, 2019).

Conclusiones

A continuación, se resaltan algunas de las ideas que promueve la relatividad general acerca del fenómeno gravitacional, las cuales pueden favorecer un entendimiento a nivel conceptual, sobre la existencia y algunas características de las ondas gravitacionales.

Se reconoce que para la formulación de la teoría de relatividad general, ante la limitación impuesta por el principio de relatividad especial, únicamente válido en marcos inerciales, Einstein se vio en la necesidad de extender la validez del mismo a marcos bajo influencia gravitacional, lo cual consiguió al concebir que la percepción de un observador en caída es indistinguible con la de un observador inercial, siendo posible con base en esto establecer una relación de equivalencia entre marcos en caída y marcos inerciales. Esto es válido únicamente en regiones puntuales del espacio circundante a un cuerpo masivo, en donde el campo gravitacional y los efectos de marea atribuidos a las inhomogeneidades del mismo, son imperceptibles, dicho de una forma distinta, donde la curvatura del espacio se puede despreciar.

Por otro lado, acerca de las razones que condujeron al planteamiento de una nueva teoría de la gravedad, se debe tener en cuenta que, en la visión clásica la interacción gravitacional entre cuerpos masivos es debida a una fuerza de atracción que actúa a distancia, sin asociarse con una velocidad de propagación, de modo que resulta ser instantánea, lo cual es incongruente con la invariancia de la velocidad de la luz.

Se reconoce que con el principio de equivalencia de relatividad general se refina la noción clásica de reposo, de modo que, es posible considerar marcos inerciales bajo la acción de un campo gravitacional, consiguiendo así generalizar la relatividad especial. Adicionalmente, este mismo principio conduce a un replanteamiento de la noción clásica de fuerza de atracción gravitacional y peso, poniendo de manifiesto que es una fuerza ficticia que permite a los observadores terrestres explicar su percepción en tierra y el resultado de sus experimentos físicos, no obstante, su existencia depende del sistema de referencia; mientras que para los observadores locales de un marco que acelera en el espacio vacío a razón de $9,8 \frac{m}{s^2}$, localmente existe una fuerza de atracción gravitacional, para un observador inercial externo que observa el marco acelerado, esta fuerza no existe.

Lo anterior implica que el movimiento orbital entre cuerpos masivos no es atribuible a una fuerza de atracción, es consecuencia de la curvatura del espacio; si se considera un cuerpo moviéndose en un espacio vacío lejos de toda distribución de masa y energía, este describe una trayectoria rectilínea, no obstante si se mueve en un espacio con curvatura, es decir, en la proximidad de un cuerpo masivo, describe una curva geodésica que se corresponde con la recta de menor distancia entre dos puntos de un espacio curvo.

Por otra parte, se resalta que, algunas de las principales predicciones de la relatividad general, como son, la curvatura de la luz, el corrimiento al rojo gravitacional, la dilatación gravitacional del tiempo, entre otras, han sido verificadas exitosamente, a través de pruebas experimentales.

Acerca de las ondas gravitacionales, se corresponden con distorsiones móviles de la geometría espacial producidas por el movimiento de cuerpos masivos a través del espacio, cabe recordar que, según la relatividad general, espacio, materia y energía interactúan, siendo este tipo de ondas una prueba más de esto, además de la curvatura del espacio por la presencia de distribuciones de masa y energía.

Por último, cabe señalar que las ondas gravitacionales comparten algunas características con las ondas electromagnéticas, ambos tipos de onda se propagan a la velocidad de la luz, son transversales, por lo que sus efectos con las partículas con las que interactúan tienen lugar en un plano perpendicular a su dirección de propagación, por lo cual, también se les asocia una polarización. Se caracterizan según su frecuencia y fuentes de emisión en el espectro gravitacional, a diferencia de las ondas electromagnéticas, la frecuencia de las ondas de gravedad es extremadamente baja, por lo cual sus periodos de oscilación van desde los ms, minutos, horas, años, hasta la edad del universo. En lo que concierne a sus longitudes de onda, las de mayor frecuencia miden algunos miles de kilómetros y en el caso de las de menor frecuencia, sus longitudes son comparables con la escala del mismo universo.

Bibliografía

Arriasecq, I., & Greca, M. (2018). Ondas gravitacionales en contexto para la escuela secundaria. *Revista de enseñanza de la física*, 27 – 34.

Acosta, L. (2017). Diseño de una secuencia didáctica para introducir algunos conceptos fundamentales de la relatividad especial a partir del análisis de la geometría de Minkowski. Tesis de grado, Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá.

Alcubierre, M. (2020) Ondas gravitacionales. Universidad Nacional Autónoma de México. Departamento de Gravitación y Teorías de Campo. Analogías y Conexiones en la Física. 145-157.

Aubrecht, G. (1986). Report on the conference on the teaching of modern Physics. *The Physics Teacher*, 24(9), 540-546.

Arnauld, N. (2017) Ondas gravitacionales: una taxonomía. Consultado 25/10/23 <https://www.scienceinschool.org/es/article/2017/gravitational-waves-taxonomy-es/>

Bonder, Y. (2018). Los principios de la relatividad: una introducción pedagógica. México: Universidad Nacional Autónoma de México. *Revista Mexicana de la física*, 87-91.

Chávez, E. (1996) El tensor de Bel-Robinson para ondas gravitacionales con rotación. Tesis de grado, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

Castañeda, L. (2017) Ondas gravitacionales: de su predicción a los premios Nobel. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Observatorio Astronómico Nacional.

Cervantes, J., Galindo, S., & Smoot, G. (2016) A Brief History of Gravitational Waves. New York: Universidad de Cornell. *Historia y filosofía de la física*.

Durán, A. (2019) Einstein y el perihelio de Mercurio. España: Blog del instituto de matemáticas de la universidad de Sevilla. Consultado el 4 de octubre del 2021. <https://institucional.us.es/blogimus/2019/04/einstein-y-el-perihelio-de-mercurio/>

Directly comparing GW150914 with numerical solutions of Einstein's equations for binary black hole coalescence (2016). Abbott, B., Jawahar, S., Lockertie, N., Tokmakov, K., & Ligo Scientific Collaboration and Virgo Collaboration. *Physical Review* 94.

García, M., & Ewert, J. (2003). *Introducción a la Física Moderna*, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Grefa, J. (2013). Relatividad General: Cálculo del Retardo de Señales en Radar con Aproximación a Segundo orden, y Radiación Gravitacional. Tesis de grado, Universidad San Francisco de Quito.

Gamboa, J., & Méndez, F. (2020) Sobre ondas gravitacionales. Universidad de Santiago de Chile. *Contribuciones científicas y tecnológicas*, Vol. 45, N°.2, 21-26.

Gómez, C. (2019). Geometría y Relatividad General: una introducción. Tesis de grado, Universidad Autónoma de Madrid.

- Hacyan, S. (1995). *Relatividad para principiantes*. México: fondo de cultura económica.
- Hacyan, S. (2019). *Ondas gravitacionales las olas invisibles del universo*. México: fondo de cultura económico.
- Hacyan, S. (2020). El principio de equivalencia y la relatividad general. México: Universidad Nacional Autónoma de México. *Analogías y conexiones en la física*, 57-67.
- Janssen, B. (2013). *Teoría de la relatividad general*, España: Universidad de Granada.
- Kalmus, P. (1992). Particle Physics at A-level-the universities' viewpoint. *Physics Education*, 27(2), 62-64.
- Lazkoz, R., & Valiente, J. (2003) Ondas gravitatorias. México: revista mexicana de física, N°.49, 384-390.
- Macias, C. (2014). *La experimentación mental en la formación de maestros de ciencias: Una alternativa para la enseñanza de la física moderna en la escuela*. Tesis de grado, Universidad de Antioquia, Medellín.
- O'Connor, J. y Robertson, E. (1996) *Descubrimiento matemático de planetas*. Escocia: MacTutor. Consultado el 13 de octubre del 2021.
- Ostermann, F., & Moreira, M. (2000). Física contemporánea en la escuela secundaria: una experiencia en el aula involucrando formación de profesores. Brasil: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. *Revista enseñanza de las ciencias*, 391-404.
- Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger (2016). LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration. *Physical Review Letters* 116.
- Pérez, H., & Solbes, J. (2003). Algunos problemas en la enseñanza de la relatividad. España: Instituto de educación secundaria. *Revista enseñanza de las ciencias*, 135-146.
- Pérez, G., Senent, F., & Solbes, J. (1986). Análisis crítico de la introducción de la física moderna en la enseñanza media. España: Instituto de ciencias de la educación, Universidad de Valencia. *Revista enseñanza de las ciencias*, 17-21.
- Pinochet, J (2014). *La curvatura de los rayos de luz en las cercanías de cuerpos masivos: una exposición para alumnos de cursos introductorios de física*. Chile: Facultad de educación, Universidad Alberto Hurtado. *Latin-American Journal of Physics Education*.
- Ramos, S. (2018). *Relatividad para futuros físicos*, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Recarens, C. (2019) *La precesión del perihelio de Mercurio*. España: Cosmos – grupo de astronomía de Mataró. Consultado el 6 de octubre del 2021.
- Sánchez, J. (2004). Einstein, la relatividad y las matemáticas. España: La Gaceta de la RSME, Vol. 7.1, 153-184.

Sánchez, J (2015). Curvatura de la luz. Honduras: Escuela de física, universidad Nacional Autónoma de Honduras. Revista de la escuela de física, 61-66.

Senet, F., & Solbes, J. (1986). Análisis crítico de la introducción de la física moderna en la enseñanza media. España: Instituto de ciencias de la educación, universidad de Valencia. Revista enseñanza de la física, Vol. 2, N°.1, 17 – 21.

Sintes, A., & González, G. (2015) Ondas gravitacionales: mensajeras del universo. España: Revista española de física, Vol. 29, N°.4, 14-18.

Sintes, A., & Sorazu, B. (2017) La observación de ondas gravitacionales con Ligo. España: Investigación y ciencia, N°.485, 16-26.

Schiller, C (2020). Relatividad y cosmología. Alemania: la montaña del movimiento.

Terrazzan, E.A. (1994). Perspectivas para a insercao da física moderna na escola media, Tese Doutorado, Universidade de Sao Paulo, Sao Paulo.

Vargas, E., & Barrera, E. (2016). Análisis de la falta de simetría del electromagnetismo clásico y su solución relativista: Tensor de campo electromagnético. Tesis de grado, Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá.

Vélez, F. (2016). Apuntes de relatividad, Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional.

Villatoro, F. (2010) La historia de la anomalía en el avance del perihelio de Mercurio y la fórmula de Gerber-Einstein. España: La ciencia de la mula Francis. Consultado el 4 de octubre del 2021.