
¿Astrofísica en la escuela?: Una propuesta
para la enseñanza de la física de agujeros
negros en la educación media

Paula Alejandra Cardona Torres

Universidad Pedagógica Nacional
Maestría en Docencia de las Ciencias Naturales
Departamento de Física
Bogotá D.C, 2023

¿Astrofísica en la escuela?: Una propuesta para la enseñanza de la física de agujeros negros en la educación media

Paula Alejandra Cardona Torres

Trabajo de grado para optar por el título de Magister en Docencia de las
Ciencias Naturales

Asesores:

MSc. Francisco Javier Orozco Gonzalez

MSc. Giovanni Sierra Vargas

Universidad Pedagógica Nacional
Maestría en Docencia de las Ciencias Naturales

Departamento de Física

Bogotá D.C, 2023

“Para todos los efectos, declaro que el presente trabajo es original y de mi total autoría: en aquellos casos en los cuales he requerido del trabajo de otros autores o investigadores, he dado los respectivos créditos”

“... El espacio de Einstein no está más cerca de la realidad que el cielo de van Gogh. La gloria de la ciencia no está en una verdad “más absoluta” que la verdad de Bach o Tolstoi, sino en el acto de la creación misma. Los descubrimientos de los científicos imponen su propio orden en el caos, como el compositor o el pintor impone el suyo; un orden que se refiere siempre a aspectos limitados de la realidad, influido por el marco de referencia del observador, que difiere de un periodo a otro, de la misma manera que un desnudo de Rembrandt difiere de un desnudo de Manet.”

Arthur Koestler.

The act of creation, 1964



The Starry night. Vincent Van Gogh, 1889.

<https://artsandculture.google.com/asset/the-starry-night/bgEuwDxe193-Pg?hl=es-419>

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradezco a Dios por la fortaleza, la sabiduría, acompañantes en cada momento de debilidad y dificultad. Por la naturaleza, el sol, la luna, las estrellas, los amaneceres, con sus atardeceres que admirados desde pequeña, puedo hoy contemplar entre tanta maldad en el mundo, las maravillas que guarda el universo. A mi familia por su apoyo incondicional, su comprensión, cariño y amor. Gracias a ellos por ser guías en este caminar: La vida.

A mis compañeras de estudio por su paciencia, apoyo y colaboración. Gracias por el sólido equipo de trabajo. Por las tardes, las noches, los fines de semana de estudio con tantas risas e historias amenas.

De igual manera, a mis asesores Francisco y Giovanni por creer en este trabajo, por su perseverancia, comprensión y orientación. Gracias por acompañarme durante este proceso, ser apoyo fundamental en la construcción de esta propuesta, dedicando su tiempo a contribuir con su conocimiento a que este proyecto resultara satisfactorio.

Agradezco a mis estudiantes por motivarme a querer ser mejor maestra día a día. A ellos, quienes acompañaron este proceso, un gracias inmenso, por hacer los días más felices, por su compañía y cariño. Finalmente a los docentes que orientaron cada seminario y al departamento de física de la UPN por contribuir en el logro de mis objetivos profesionales.

Paula A. Cardona

Índice general

Lista de Símbolos	IV
Lista de Figuras	VIII
Lista de cuadros	IX
Introducción	x
1. Contexto origen	1
1.1. Sobre la enseñanza de la astrofísica en la escuela	8
1.2. Objetivo General:	19
1.2.1. Objetivos específicos:	19
2. Gravedad y Luz	20
2.1. Teorías de gravitación	20
2.1.1. La fuerza gravitacional de Newton	21
2.1.2. La gravedad: ¿Un efecto de la curvatura espacio-temporal?	26
2.1.3. Ecuaciones de campo de Einstein	32
2.2. La luz	37
2.2.1. Estudios sobre la naturaleza de la luz: ¿Onda y/o partícula?	38
2.2.2. Curvatura de la luz por la gravedad	43
3. Un viaje hacia los agujeros negros	51
3.1. Agujeros negros	51
3.1.1. Las estrellas oscuras de Michell y Laplace	52
3.1.2. Renacer de las estrellas oscuras: Solución de Schwarzschild	56
3.2. Astrofísica de agujeros negros	62

3.2.1. Evolución estelar	63
3.2.2. Colapso gravitacional estelar	78
3.2.3. Clasificación, estructura y detección de agujeros negros	82
4. Aspectos pedagógicos y didácticos	96
4.1. Perspectivas sobre la enseñanza de la astronomía	96
4.2. Didáctica de la astronomía: Un campo en construcción	100
4.3. Por una apuesta crítica a la enseñanza de las ciencias	104
4.4. Diseño de la propuesta de aula	111
4.4.1. Fases y momentos de la propuesta de aula	112
4.5. Hallazgos, alcances y proyecciones: ¿Una propuesta orientada hacia la Ciencia abierta?	130
5. Reflexiones finales	142
Referencias Bibliográficas	148
I Anexos	159
Solución de Schwarzschild	160
Actividades propuestas para los estudiantes	161

Lista de Símbolos

Subíndices

Subíndice	Término
$T_{\mu\nu}$	Tensor energía - momento
$g_{\mu\nu}$	Tensor métrico
$R_{\mu\nu}$	Tensor de Ricci
R	Escalar de curvatura

Constantes

Constante	Término
G	Constante de gravitación universal
c	Velocidad de la luz
M_{\odot}	Masa Solar
R_{\odot}	Radio Solar

Índice de figuras

2.1. Representación de la fuerza de atracción gravitacional de dos masas. Tomada de: https://www.uv.es/jmarques/_private/Campogravitatorio.pdf	23
2.2. Principio de equivalencia, denominada como uno de los experimentos mentales fundamentales para Einstein, ya que le permitió sentar las bases de la relatividad general. Imágenes tomadas de: http://astro.physics.sc.edu/selfpacedunits/Unit57.html	29
2.3. Representación de la curvatura causada por el sol y el recorrido de la Tierra y Marte. Tomada de: http://woodahl.physics.iupui.edu/Astro100/S3-13b_anno.jpg	32
2.4. Ilustración del experimento de Galileo Galilei. Tomada de: https://museovirtual.csic.es/salas/luz/luz2.htm	39
2.5. Ilustración del experimento de Roemer Tomada de: Choudhury, B. (2016). From infinite to finite - Measurements on speed of light: A historical review.	40
2.6. Ilustración sobre las direcciones que toma un rayo de luz bajo marcos inerciales y marcos no inerciales. Tomado de: Hartle, J. (2014). “Gravity: An introduction to Einstein’s General Relativity”. First Edition. United States of America: Pearson Education Limited.	44
2.7. Representación de las trayectorias de la luz y las posiciones aparente de una estrella A (Star A) y una estrella B (Star B) alejada de la curvatura producida por la luz. Tomado de: Bennett, J. Donahue, M. Schneider, N. y Voit, M. (2020). “The cosmic perspective” (p. 1574)	45
2.8. Ilustración del experimento de Eddington para determinar a deflexión de la luz causada por el sol. Tomado de: https://sciencemeetsfaith.wordpress.com/2018/05/29/arthur-s-eddington-and-the-bending-of-light/	48

2.9. Fotografía del cúmulo de Híades por el astrónomo Jose Mtanous. Tomado de: https://apod.nasa.gov/apod/ap200122.html	48
2.10. Fotografía con mayor resolución del eclipse de 1919. Tomado de: https://www.eso.org/public/spain/images/potw1926a/	49
3.1. Comportamiento de la luz emitida por una estrella. Tomada de: Thorne, K. “Agujeros negros y tiempo curvo: El escandaloso legado de Einstein”	53
3.2. Ilustración 2D de un agujero negro, con su horizonte de eventos. Tomada de: https://reader.digitalbooks.pro/content/preview/books/55547/book/OEBPS/capitulo-1.html	61
3.3. Pilares de la creación tomada por el telescopio espacial James Webb de la NASA. Tomada de: https://reader.digitalbooks.pro/content/preview/books/55547/book/OEBPS/capitulo-1.html	69
3.4. Ilustración de la evolución del Sol en el diagrama H-R. Tomado de: Bennett, J. et al (2018). “The cosmic perspective” (p. 291).	73
3.5. Ilustración del corrimiento al rojo para la luz que emite una estrella que se aleja a la Tierra. Tomado de: https://www.enterarse.com	80
3.6. Esquema de formación de un agujero negro a través del colapso gravitacional. Tomado de: Luminet, J. (1991). “Agujeros negros”. Madrid – España, Alianza Editorial. Capítulo 9: El horizonte quimérico. (p.155)	81
3.7. Ilustración de las partes de un agujero negro. 1. Singularidad 2. Radiación de Hawking 3. Horizonte de eventos 4. Ergosfera 5. Disco de acreción. Toma- do de: Kurzgesagt (18 de febrero 2023). https://twitter.com/Kurz_Gesagt/status/1626945094380134406	86
3.8. Imagen del cuásar doble. Tomado de: https://www.galactic-hunter.com/post/twin-quasar	88
3.9. Cuásar (azul) lente de una galaxia (roja). Captado por el telescopio Keck II Tomado de: http://www.astro.caltech.edu/~george/qsolens/	89
3.10. Explicación de la lente gravitacional descubierta en el año 2010. Tomado de: https://sites.astro.caltech.edu/~george/qsolens/	90
3.11. Diagrama del sistema binario Hulse/Taylor. Tomado de: https://asd.gsfc.nasa.gov/blueshift/index.php/2016/03/17/we-knew-that-already/	91

3.12. Ilustración del funcionamiento de los interferómetros LIGO. Tomado de: https://phys.org/news/2019-05-ligo-virgo-neutron-star-smash-ups.html . . .	92
3.13. Imagen de M87* por event horizon telescope. Tomado de: https://www.eso.org/public/images/eso1907a/	93
3.14. Imagen de Sagitario A* por event horizon telescope. Tomado de: https://www.eso.org/public/images/eso2208-eh-t-mwa/	94
4.1. Esquema de síntesis sobre las características de la didáctica de la Astronomía. Tomado de: http://snea2011.vitis.uspnet.usp.br/sites/default/files/SNEA2011_Palestra_Camino.pdf	102
4.2. Esquema del modelo de educación bancaria de Freire. Elaboración propia	105
4.3. Relación dialéctica entre lenguaje, experiencia y conocimiento que se encuentra a la base del aprendizaje. Elaboración propia	110
4.4. Criterios que configuran el diseño de la propuesta de aula. Elaboración propia.	112
4.5. Esquema procedimental de la fase 1 Introducción y contextualización. Elaboración propia.	113
4.6. Esquema procedimental de la fase 2 Acercamiento a la física de agujeros negros. Elaboración propia.	115
4.7. Portada de material para los estudiantes. Elaboración propia.	130
4.8. Socialización en los grupos de trabajo	134
4.9. Elaboración de las ilustraciones en los grupos de trabajo	136
4.10. Ejemplos de ilustraciones realizadas por los grupos de trabajo	137
4.11. Actividad vivencial sobre la masa, densidad y volumen	139
4.12. Actividad vivencial sobre la masa, densidad y volumen	140
5.1. Portada. Elaboración propia.	162
5.2. Fase 1: Indagación. Elaboración propia	163
5.3. Fase 1: Ilustraciones. Elaboración propia	164
5.4. Fase 2: Sobre la densidad, masa, volumen y la materia en los agujeros negros. Elaboración propia	165
5.5. Fase 2: Sobre la densidad, masa, volumen y la materia en los agujeros negros. Elaboración propia	166

5.6. Fase 2: Sobre la densidad, masa, volumen y la materia en los agujeros negros. Elaboración propia	167
5.7. Fase 2: De la gravitación y la razón por la cual los agujeros negros no emiten luz. Elaboración propia.	168
5.8. Fase 2: De la gravitación y la razón por la cual los agujeros negros no emiten luz. Elaboración propia.	169
5.9. Fase 2: De la gravitación y la razón por la cual los agujeros negros no emiten luz. Elaboración propia.	170
5.10. Fase 2: De noticias, fotografías y premios nobel: Los agujeros negros en la ac- tualidad. Elaboración propia.	171
5.11. Fase 2: De noticias, fotografías y premios nobel: Los agujeros negros en la ac- tualidad. Elaboración propia.	172

Índice de cuadros

1.1. Fragmento del Hipertexto Santilla Física 1. 2011. Página 155	12
1.2. Fragmentos del libro: Fundamentos de Física Vol 1: Serway y Vuille (2012) . .	12
1.3. Fragmentos del libro: Física para ciencias e ingeniería Vol. 1: Giancoli (2008) .	13
2.1. Cuadro comparativo de la gravitación entre Newton y Einstein. Imágenes tomadas de: https://www.chegg.com/learn/topic/albert-einstein-general-relativity	36
3.1. Los agujeros negros desde la perspectiva de la ley de gravitación y la relatividad general.	60
3.2. Explicación de las secciones que componen el diagrama de Hertzsprung-Russell.	67
3.3. Ilustración de los procesos de nucleosíntesis estelar. A la izquierda se presenta una explicación de la cadena protón-protón y a la derecha el ciclo CNO. Tomado de: Bennett, J. et al (2018). “The cosmic perspective” (p. 294 y 348).	70
3.4. Ilustración del equilibrio hidrostático y energético del Sol. Tomado de: Bennett, J. et al (2018). “The cosmic perspective” (p. 290- 291).	71
3.5. Fotografías de una estrella binaria enana blanca (costado izquierdo) (Imagen tomada de: https://esahubble.org/images/heic0516a/) y la nebulosa de Cangrejo que contiene una estrella de neutrones (costado derecho) (Imagen tomada de: https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/messier-1-the-crab-nebula)	77

Introducción

Pensar por un instante en el cosmos y los estudios sobre el universo, abre un sin número de variables, multiplicidades, conexiones e interrelaciones tan interesantes y complejas como lo es la infinitud misma. Esto equivale a aceptar de antemano, la imposibilidad que tenemos los seres humanos para conocerlo y comprenderlo en su totalidad. El universo guarda sus propios secretos que valen la pena descubrir. Tan sólo conocemos una parte de él en pequeñas proporciones que, se han juntado como un rompecabezas a medida del devenir de las sociedades desde los avances investigativos característicos de la ciencia empírica y experimental.

Esas pequeñas proporciones que conocemos del universo sin duda han contribuido de forma significativa a la búsqueda constante del hombre por conocer-se y comprender su origen. Todas ellas, a su vez, han producido nuevas perspectivas que desplazan la mirada antropocéntrica del ser humano y que le invitan a pensarse en coexistencia con el cosmos. De ahí que se conciba la astronomía como un campo de conocimiento indispensable en la enseñanza de las ciencias naturales, ya que permite replantear la relación entre el hombre y la naturaleza alrededor de su vida en el planeta Tierra.

En este marco el presente trabajo emerge de ese tejido epistémico que subyace de los debates, perspectivas y reflexiones en torno a la astrofísica -particularmente de los agujeros negros-, y en específico, a su enseñanza en la escuela. Más que un intento por establecer un balance sobre el avance científico de este campo en el país, se exponen sus tensiones, problemas y desafíos trascendiendo la importancia del estudio del universo como una apuesta fundamental para la comprensión humana desde una dimensión individual y colectiva.

Por esta razón, se reconoce que la creación de escenarios en los cuales se aborde la astrofísica en la escuela, supone una serie de discusiones alrededor de la práctica docente; puesto que implica una reflexión crítica tanto de su formación disciplinar como de su ejercicio pedagógico en el aula.

En ese sentido, el trabajo parte de un contexto origen en el cual se describe el planteamiento del problema, la justificación y los antecedentes, que yacen de la recopilación de algunos elementos de carácter histórico y pedagógico. Todo ello, encaminado esencialmente a la enseñanza de la física moderna y la astrofísica en la escuela. Luego, se expone la pregunta que orienta el trabajo, así como sus objetivos (general y específico).

Para abordar la profundización disciplinar, es relevante mencionar que tras una revisión bibliográfica inicial se decide encaminar el estudio de agujeros negros a partir de los conceptos de gravedad, luz y astrofísica de estas regiones espacio-temporales. Para este fin, se considera necesario la búsqueda de fuentes primarias originales.¹

De ahí que, se abordan los aspectos de orden histórico y teórico alrededor de la ley de gravitación universal de Newton y la teoría general de la relatividad de Einstein. Luego, se describen algunos elementos epistemológicos acerca de la naturaleza de la luz, la medida de su velocidad y la trayectoria que toma en campos gravitacionales.

Posteriormente, se realiza un estudio de carácter histórico, epistemológico y teórico de los agujeros negros. Inicialmente, se describen las ideas preliminares de estos cuerpos por parte de John Michell y Pierre S. Laplace, bajo el nombre de estrellas invisible u oscuras. Después, se retoma el estudio de la relatividad general, para describir la primera aproximación moderna de estas regiones denominadas singularidades de Schwarzschild. Luego, se resaltan algunos elementos propios de la astrofísica para explicar su origen a través de la evolución estelar. De igual manera, se exponen las características para su clasificación y descripción de su estructura. Finalmente, se mencionan algunas generali-

¹Las traducciones que se observarán a lo largo del trabajo han sido elaboraciones propias. Sin embargo, para aquellos han sido tomados de otras fuentes, se ha realizado su respectiva cita.

dades a la detección de agujeros negros mediante lentes y ondas gravitacionales, así como las fotografías.

A continuación, se describen las consideraciones pedagógicas y didácticas. Para ello, se dan a conocer algunas perspectivas relacionadas con la enseñanza de la astronomía. Después, se hace énfasis sobre el trabajo que se ha realizado alrededor de la didáctica de la astronomía, que se reconoce como un campo en auge. Después, se realiza una reflexión crítica frente a la enseñanza de las ciencias, a través del análisis del papel del maestro como investigador e intelectual y del rol del lenguaje, la experiencia y el conocimiento en los procesos de aprendizaje. Posteriormente, se presenta el diseño de la propuesta de aula el cual emerge de los criterios epistemológicos, teóricos, pedagógicos y didácticos. Finalmente, se exponen los hallazgos de su puesta en marcha en la escuela como prueba de validación de las actividades, así como sus alcances y proyecciones.

Por último, se presenta una retrospectiva en la cual se exponen las reflexiones que emergen de este proyecto. Allí se realiza una descripción frente a los retos, las dificultades y los alcances que tuvo la elaboración de este trabajo. De igual manera, presenta una serie de elementos de análisis que yacen de la implementación que, aunque, no es uno de los ejes principales de este trabajo, permite reconocer la dimensión que puede tener esta propuesta. Posteriormente, se mencionan ciertos aportes que contribuyen a la formación como docente, en la cual se resalta la importancia de tomar una postura crítica frente a la enseñanza de las ciencias y las prácticas como maestra en el aula.

Capítulo 1

Contexto origen

*“Astronomy is useful because it raises us above ourselves;
it is useful because it is grand. . .
It shows us how small is man’s body. . . .”
Henri Poincaré, 1905.*

A lo largo de la historia, la astronomía se ha destacado por ser una de las ciencias más antiguas de la humanidad. Las observaciones hacia el cielo permitieron a nuestros antepasados utilizarla a modo de recurso práctico-cultural, que fue clave en las predicciones que se hacían de las épocas de sequía, de lluvia, de abundante cosecha e incluso de hambruna. Así mismo, tuvo una estrecha relación con los rituales y las ceremonias de carácter religioso que solían realizar algunas culturas primitivas pues su contemplación “(...) comenzó como un intento de averiguar el designio de los dioses, de interpretar sus intenciones y vaticinar sus consecuencias” (Cardona, 2012, p.09). Sin embargo, a través de los siglos, los estudios alrededor de la bóveda celeste tomaron un rumbo diferente debido a las diferentes contribuciones culturales, científicas y filosóficas que han proporcionado un conocimiento del cosmos y que ha transformado de forma significativa la mirada con que el hombre contempla el firmamento, convirtiéndose en una experiencia trascendente.

Desde la antigüedad se generó una fascinación especial por la contemplación del cielo nocturno, en particular por las estrellas que resaltaban en la oscuridad. Los misterios que alberga el firmamento han llevado al hombre a querer conocer más allá de lo visible, e incluso, a indagar sobre su mismo origen. Es así como a través de los avances en el

conocimiento humano y por tanto en la tecnología, se han establecido nuevas formas de observar el cielo, lo cual ha hecho que actualmente se hable con mayor frecuencia de distintas situaciones tales como: la posibilidad de viajes espaciales, vida en otros planetas, existencia de multiversos y demás; ideas que pueden encontrarse además en los diferentes medios de comunicación.¹ De ahí que, la interacción con estos medios junto con la experiencia personal como docente de física en algunos colegios de Bogotá, de carácter privado y público, se ha podido reconocer que existe un claro desconocimiento de la relación de los desarrollos tecnológicos con las ciencias y también de la astronomía con la física, es decir de la astrofísica.²

En la antigüedad, la astronomía fue utilizada por las civilizaciones como un recurso práctico-cultural, ya que las observaciones hacia el cielo permitían sembrar y cosechar las tierras; además, realizar una serie de rituales para sus deidades. Lo anterior permitió posteriormente a los griegos, a través de la observación rigurosa, establecer modelos cosmológicos. Uno de ellos fue precisamente el que emerge de la teoría geocéntrica propuesta por Aristóteles y Ptolomeo, en la cual se afirmaba que la Tierra se situaba en el centro del universo y alrededor todas las demás esferas celestes en las que se ubicaban los planetas, el Sol y la Luna. Esta visión del cosmos, dominó el pensamiento occidental en los campos de la astronomía y la cosmología por varios siglos.

Sin embargo, fue hasta la edad media donde la denominada revolución copernicana planteó esa mirada antigua del mundo, especialmente respecto al origen y disposición del Universo.³ Este nuevo modelo cosmológico –la teoría heliocéntrica de Nicolás Copérnico–

¹De las noticias que se han destacado durante los últimos años han sido precisamente la fotografía de agujeros negros: BBC News Mundo, (Abril, 2019). “Primera foto de un agujero negro: así son los alrededores de la imagen que le da la vuelta al mundo” BBC News: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-47915625>; Drake, N, (Mayo, 2022). “Esta es la primera imagen del inmenso agujero negro del centro de nuestra galaxia” National geographic: <https://www.nationalgeographic.es/espacio/2022/05/esta-es-la-primera-imagen-del-inmenso-agujero-negro-del-centro-de-nuestra-galaxia>

²Con relación a ello, se encuentra que algunas temáticas de astronomía propuestas por los estándares del MEN están delegados a los maestros de ciencias sociales. Esto se abordará en las próximas páginas..

³Es importante mencionar que, “(...) durante toda la Edad Media y gran parte del Renacimiento, la Iglesia católica fue la autoridad intelectual dominante en toda Europa. Los eruditos europeos medievales eran miembros del clero; las universidades en las que encontraba cobijo y tribuna la ciencia antigua

generó un gran cambio en la forma en cómo se entendía la estructura del cosmos; ya que dejó de lado la idea de una Tierra como centro del Universo y la ubicó en un lugar igual a otros planetas, situando el Sol en el medio. El heliocentrismo progresó particularmente por los modelos matemáticos de Johannes Kepler -los cuales realizó a través de las observaciones de Tycho Brahe-, también, por la invención del telescopio de Galileo Galilei que impactó significativamente el desarrollo de la astronomía y que permitió, años más tarde, con el progreso de los principios newtonianos, convertirla “(...) en algo aceptable tanto desde el punto de vista físico como desde el cosmológico” (p. 637); reconociendo así el carácter intrínseco de la astronomía con las ciencias físicas (Kuhn, 1957).

Los principios matemáticos de la filosofía natural (Los principia) propuestos por Isaac Newton⁴ en 1687 menciona Hawking (1987) “(...) is probably the most important single work ever published in the physical sciences” [Es probablemente la obra individual más importante jamás publicada en las ciencias físicas] (p. 13); puesto que sentaron las bases de lo que hoy se conoce en la física como la mecánica clásica. En este punto, es significativo reconocer las perspectivas en las que se proyectan las leyes de la dinámica que en su momento fueron estudiadas por Galileo Galilei y la manera en que “(...) proporcionaron el nexo entre las leyes de Kepler y el mundo físico” (Hawking, 2004, pp. 284-285), lo cual contribuyó significativamente en el desarrollo de la astronomía mediante la mecánica celeste. Sin embargo, afirma Kuhn (1957)

(...) el universo newtoniano no era un simple marco donde encuadrar la

Tierra planetaria de Copérnico, sino algo mucho más importante, una nueva pertenecían a la Iglesia. Desde el siglo IV al XVII, la actitud de la Iglesia respecto a la ciencia en general y a la estructura del universo en particular fue un factor determinante en el progreso o estancamiento de la astronomía.” Véase en: Kuhn, T (1957). “La revolución copernicana. La astronomía planetaria en el desarrollo del pensamiento occidental.” Capítulo 4: La tradición remodelada: De Aristóteles a los Copernicanos. (pp. 277-278)

⁴Según Hawking (1987) “The original impulse which caused Newton to write the principia was a question from Edmund Halley as to whether the elliptical orbits of the planets be accounted for on the hypothesis of an inverse square force directed towards the Sun.” [El impulso original que llevó a Newton a escribir los Principia fue una pregunta de Edmund Halley sobre si las órbitas elípticas de los planetas podían explicarse con la hipótesis de una fuerza dirigida hacia el sol inversa al cuadrado.] Chapter I: Newton’s Principia.

forma de observar la naturaleza, el hombre y Dios: una nueva perspectiva científica y cosmológica que a lo largo de los siglos XVIII y XIX enriquecería una y otra vez las ciencias. (...) (pp. 637-638)

Por ende, estos planteamientos permitieron también identificar desde la mirada clásica las concepciones que se tenían referentes al espacio, el tiempo y la gravedad⁵ en contraste con las que se tienen en la actualidad con la llegada de la física moderna mediante el desarrollo de la Teoría de la Relatividad propuesta por Albert Einstein en 1905.

Una de las relaciones entre la física y la astronomía que se suele abordar en la escuela es mediante la Ley de Gravitación Universal de Newton, la cual afirma que, existe una fuerza de atracción que es proporcional a la masa e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Sin embargo, en los contextos escolares los fenómenos gravitacionales quedan limitados casi exclusivamente a la interacción gravitatoria generada por la Tierra, es decir a la caída de los cuerpos, que es considerado como un fenómeno usual dentro de nuestra experiencia. No obstante, de acuerdo con Weinberg (1987) "(...) The central part of the Newtonian achievement (...) is his theory of the solar system" [La parte central del logro newtoniano (...) es su teoría del sistema solar] (p. 5); ya que, este principio universal ha explicado no sólo la aceleración que puede experimentar un cuerpo como resultado de la fuerza producida por la intensidad del campo gravitacional, sino el movimiento planetario en el Sistema Solar, entre otras; que hizo posible plantear la astronomía desde las leyes físicas con el estudio de la mecánica celeste.⁶

El estudio realizado por la mecánica celeste, junto con los hallazgos de tipo obser-

⁵"Newton considera el espacio y la duración (tiempo absoluto) como dos seres cuya existencia se deduce necesariamente del mismo Dios. (...) El espacio y la duración son pues, según Newton, dos atributos necesarios. (...) Medimos algunas partes impropriadamente denominadas espacio, por medio de los cuerpos extensos que tocamos. Medimos partes propiadamente llamadas duración, por medio de los movimientos que percibimos." Con ello, Newton deja claro su postura frente al espacio y el tiempo como absolutos y continuos. Véase en: Lafuente, A y Arboleda, L. (1996). "Voltaire. Elementos de la filosofía de Newton." Editorial Universidad del Valle. Capítulo I y II.

⁶La mecánica celeste no proporcionaba solución a algunos problemas como: la precesión del perihelio de Mercurio, la curvatura de la luz, entre otros. Véase en: Sánchez, J (1985). "Origen y desarrollo de la relatividad". Capítulo VIII

vacional, generaron dentro de la comunidad científica de los siglos XIX y XX una gran actividad en torno a la reformulación de la ley de gravitación universal, que para ese momento era uno de los pilares fundamentales de la denominada física clásica (Sánchez, R. 1985 pp. 116-117). En esta instancia, la gravitación y especialmente su naturaleza se configuran como un tema enigmático e incluso incomprensible para algunos científicos. No obstante, afirma Cardona (2012) a propósito de los descubrimientos a inicios del siglo XX que, “(...) los avances en el campo de la física proporcionaban nuevos instrumentos y técnicas, cuyo profuso empleo en astronomía hacían que fuera una de las ciencias más beneficiadas por ello” (p. 252); lo cual se evidenció más tarde con la formulación de otras teorías⁷ que han explicado fenómenos astrofísicos tan complejos tales como los agujeros negros y/o las ondas gravitacionales.⁸

En la primera mitad del siglo XX se llevaron a cabo dos grandes revoluciones científicas que permitieron abrir el panorama frente a la explicación de algunas cuestiones físicas, las cuales fueron posible abordar a través de la reformulación de algunos conceptos claves de la física clásica. Lo anterior, se fundamentó con la llegada de la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad que, en cierta medida, explicaron fenómenos como la espectroscopia, la radiación y la física atómica, entre otros, a la vez que permitió resolver las incongruencias entre la electrodinámica de Maxwell y la mecánica de Newton; así como algunos eventos astronómicos como la anomalía del perihelio de Mercurio (Sánchez, 2008).

Estos nuevos campos de conocimiento (la cuántica y relatividad) que se desarrollaron durante el siglo XX, fueron claves no sólo en el desarrollo de la tecnología de este momento, sino también, tuvieron un aporte trascendental en la estructura de las ciencias físicas puesto que establecieron nuevas perspectivas frente a la comprensión de los fenómenos atómicos y gravitatorios. La teoría de la relatividad general, por ejemplo, fue rechazada en principio por la comunidad científica de la época pues “(...) para llevar a cabo la

⁷A partir del desarrollo de las teorías elaboradas durante los siglos XIX y XX fue posible abrir nuevos campos de estudio como fueron la cosmología, la astrofísica, la física de altas energías, entre otras.

⁸En este punto es importante mencionar que la evolución del concepto de gravedad se ha configurado desde esas experiencias a priori sobre la caída de los cuerpos por Aristóteles, hasta algunas más abstractas como lo es la curvatura del espacio-tiempo por A. Einstein.

transición al universo de Einstein, todo el conjunto conceptual cuyas ramificaciones son el espacio, el tiempo, la materia, la fuerza, etc; tenía que cambiarse y establecerse nuevamente sobre el conjunto de la naturaleza” (Kuhn, 1962).

Por esta razón, la idea revolucionaria de Einstein se enmarcó en replantear las ideas del tiempo y del espacio arraigada en las concepciones clásicas newtonianas -en las cuales el espacio se concebía como absoluto, homogéneo, inmutable, isotrópico y plano que no era afectado por la materia y la duración (tiempo) como absoluta, verdadera y matemática que fluía sin relación alguna con nada externo-; se transformaron radicalmente (Hawking, 2004, pp. 501-505). La mirada contemporánea relativista permite concebir un espacio-tiempo tetradimensional en la que los sistemas de referencia cobran un papel fundamental a la hora de establecer la dependencia de los observadores con la simultaneidad de acontecimientos o la medida de longitudes. Así mismo reconoce que la masa de un objeto varía con la velocidad, siendo la velocidad de la luz una constante, mientras que la materia se caracteriza por generar afectaciones sobre la estructura del espacio. Lo anterior, desde una perspectiva epistemológica, posibilita pensar el carácter constructivo de las ciencias en donde “nunca hay, ni puede haber, una visión única del mundo y obligatoria para todos” (Mèlich, 2005).

Abordar las temáticas relacionadas con los fenómenos gravitatorios desde el punto de vista de la física moderna, permite abrir el panorama para los estudiantes de básica secundaria, media y maestros sobre la importancia de concebir las ciencias como ese campo de conocimiento que se encuentra en constante construcción y reconstrucción a lo largo de la historia. Es preciso resaltar que las ciencias han estado mediadas y fundamentadas por su carácter cultural y colectivo, lo cual se ejemplifica claramente en la actividad científica llevada a cabo desde el siglo XX hasta la actualidad, en donde el auge acelerado de la tecnología está también de la mano con el progreso en el conocimiento humano.

Debido a estos desarrollos, la innovación de herramientas tecnológicas, así como los avances teóricos y científicos han hecho posible evidenciar un progreso significativo en la astrofísica, la cual ha pasado de su explicación clásica mediante la mecánica celeste de Newton a la postura actual de la teoría general de la relatividad de Einstein, que

ha proporcionado además un estudio notable sobre los agujeros negros. Por esta razón, desarrollar nuevas perspectivas analíticas en la enseñanza de las ciencias, que den lugar a considerar en el contexto escolar los conceptos propios de la física moderna como un aspecto fundamental en la enseñanza, demuestra que “la transición de la mecánica de Newton a la de Einstein ilustra con una claridad particular la revolución científica como un desplazamiento de la red de conceptos a través de la que ven el mundo los científicos” (Kuhn, 1962, p.163). Lo anterior, no sólo fue evidente en el cambio de paradigma en la física y el mundo científico⁹, sino que fue sustancial e impuso sus estándares más altos en el desarrollo del pensamiento humano a partir de los grandes avances de la ciencia y la tecnología en el siglo XX los cuales siguen siendo fundamentales en la actualidad.

Por esta razón, replantear las concepciones que se tienen sobre la astronomía y su relación con la física dentro de la escuela, parece ser casi indispensable para poder responder a las inquietudes que surgen en los estudiantes referentes a los últimos hallazgos que se han llevado a cabo por los avances tecnológicos. Desde esta perspectiva, señalan Pinto y Zanetic (1999):

É preciso transformar o ensino de Física tradicionalmente oferecido por nossas escolas em um ensino que contemple o desenvolvimento da Física Moderna, não como uma mera curiosidade, mas como uma Física que surge para explicar fenômenos que a Física Clássica não explica, constituindo uma nova visão de mundo. Uma Física que hoje é responsável pelo atendimento de novas necessidades que surgem a cada dia, tornando-se cada vez mais básicas para o homem contemporâneo, um conjunto de conhecimentos que extrapola os limites da ciência e da tecnologia, influenciando outras formas do saber humano. [Es necesario transformar la enseñanza de la Física que tradicionalmente ofrecen nuestros colegios en una enseñanza que contemple el desarrollo de la Física Moderna, no como una mera curiosidad, sino como una Física que surge para explicar fenómenos que la Física Clásica no explica, formando una nueva visión del mundo. Una Física que hoy es responsable por atender

⁹De acuerdo con Kuhn un paradigma hace referencia a “(..) realizaciones científicas universalmente reconocidas que, durante cierto tiempo, proporcionan modelos de problemas y soluciones a una comunidad científica.” (Kuhn, 1962, pp. 13-14)

las nuevas necesidades que surgen cada día, volviéndose cada vez más básicas para el hombre contemporáneo, un conjunto de conocimientos que rebasan los límites de la ciencia y de la tecnología, influyendo en otras formas del conocimiento humano.] (p. 07)

Por ello, reconocer el papel de la física moderna en los viajes espaciales turísticos, fotografías de agujeros negros, detección de ondas gravitacionales, la llegada del *perseverance* a Marte, el descubrimiento de agujeros negros supermasivos en el centro de la galaxia, entre otros; de los cuales se hablan en la actualidad, ha develado la importancia de desarrollar y profundizar las temáticas sobre la gravitación y la astrofísica en los contextos escolares. Puesto que, abre la posibilidad también de reconocernos como seres humanos que, buscamos incesantemente las respuestas ante el enigma del devenir del universo y de la especie humana. Sin embargo, ¿Qué es lo que no permite abarcar conceptos de la física moderna en la educación básica y media? ¿Por qué es importante la enseñanza de la astronomía y astrofísica en los colegios del país?.

1.1. Sobre la enseñanza de la astrofísica en la escuela

La astronomía es una de las ciencias que en la actualidad, ha tomado mucha relevancia por los numerosos hallazgos que se han hecho durante el último siglo. Tales avances, inevitablemente resuenan dentro del aula y se convierten en un campo de estudio que tiene un gran atractivo en la escuela lo cual desde la experiencia como docente de física se ha evidenciado. Sin embargo, la enseñanza de esta ciencia carece de espacios que permitan abordar las preguntas y/o reflexiones que tienen los estudiantes respecto a ciertos fenómenos astronómicos, de manera que, “(...) our students are influenced by the astronomy which they learn outside the classroom, as much or more than by the astronomy which they learn from us” [Nuestros estudiantes están influenciados por la astronomía que ellos aprenden fuera del aula, mucho más que por la astronomía que aprenden de nosotros](Percy, J. 1998).

De ahí que, la poca influencia de la astronomía en la escuela ha puesto en consideración la necesidad de tomar este campo de estudio como parte fundamental de la enseñanza

de las ciencias naturales, ya que pueden ser los intereses que tienen los estudiantes en esta ciencia una forma de acercarlos a las ciencias exactas. No obstante, existen algunas dificultades de tipo estatal, ministerial e incluso dentro de la formación propia de los docentes en ciencias naturales que limitan los espacios de aprendizaje de la astronomía y astrofísica, lo cual se abordará a continuación.

En primer lugar, se ha podido observar que el estudio de estas áreas específicas del conocimiento científico y su enseñanza, han sido poco desarrolladas en el país y limita además el ejercicio de la labor investigativa. Por ejemplo, existen algunas problemáticas que yacen de la formación de docentes en las instituciones de educación superior y que dificulta la enseñanza de la física moderna en los colegios. Tal como lo señala Macías (2014), los contenidos especializados que se derivan de los currículos y planes de estudio, carecen de tópicos en esta área de la física lo cual cierra las puertas a abordarlas en la escuela, donde tampoco se exige desde las reglamentaciones ministeriales y que termina por desmejorar la calidad en la educación en ciencias naturales (Macias, 2014). De igual manera, muchas instituciones de educación superior -en comparación con otros que se encuentran en el extranjero y que han logrado desarrollos significativos en estas áreas del conocimiento y su enseñanza- no cuentan con la infraestructura adecuada, ni con los equipos e instrumentos tecnológicos suficientes y actualizados para llevar a cabo una labor investigativa. La escasa inversión por parte del estado a la ciencia y la tecnología impide cualquier posibilidad de avance científico, tecnológico e investigativo en el país.

Por otro lado, es relevante reconocer que en nuestro país la enseñanza de la física en la educación básica y media está reglamentada por los lineamientos y estándares curriculares expedidos por el Ministerio de Educación Nacional (MEN) para el área de ciencias naturales. Estos estándares buscan que los estudiantes puedan desarrollar habilidades científicas y actitudes que les permitan explorar fenómenos para resolver sus interrogantes. Por tanto, son el punto de referencia para que las instituciones educativas de carácter público, privado y en concesión definan lo que los estudiantes deben “saber y saber hacer, en cada una de las áreas y niveles” (MEN, 2004).

Teniendo en cuenta lo anterior, la enseñanza de la física se caracteriza por propiciar

elementos y establecer relaciones con el entorno físico como lo son: la materia, la energía, el movimiento, las fuerzas y leyes que explican algunos fenómenos naturales. Sin embargo, este campo disciplinar reviste de otras complejidades que se escapan de la directriz ministerial, quedando limitada a los temas que se establecen dentro de los estándares de educación y que, en su mayoría, abarcan conceptos de la física clásica sin mencionar temáticas que tengan en cuenta la física moderna y contemporánea, como es por ejemplo, la física de partículas, la mecánica cuántica, la física del estado sólido, la astrofísica y la cosmología, entre otros. Lo anterior genera que los estudiantes no consideren la importancia tanto de los saberes clásicos como de los actuales en la innovación y desarrollo tecnológico (Prieto y Organista, 2011).

De ahí que, desde los estándares educativos por el Ministerio de Educación Nacional (MEN), se evidencia que los conceptos fundamentales de la Astrofísica han quedado casi omitidos y/o delegados a los maestros de ciencias sociales en algunas instituciones, aun cuando ésta es un área de competencia de las ciencias naturales. Este es uno de los factores que impiden abordar a profundidad el estudio de la astrofísica en el aula, ya que el acercamiento de este campo del saber desde las ciencias sociales se realiza a través de la geografía de manera que su enseñanza queda dentro de las generalidades de la astronomía.¹⁰

Por otra parte, es significativo reconocer que en los estándares existen algunas temáticas que se relacionan directamente con la astronomía como lo es la formación y extinción de estrellas, el origen y evolución del universo, entre otros, que se evidencia en los estándares de grado Sexto y Séptimo en el entorno físico. Sin embargo, en algunas instituciones de educación básica y media, la formación de ciencias tales como la física y la química, se empiezan a introducir en los currículos desde algunos grados anteriores a los grados décimo y undécimo, lo cual no permite abordar aquello que se fija en los estándares, como “la formación y extinción de estrellas”. Por esta razón, los temas referentes a la astronomía parecen quedarse en ese único ítem frente a la evolución estelar que se establece para grado sexto; de ahí en adelante aunque se identifica otro parámetro en grado

¹⁰De igual manera, existen algunas dificultades dentro de los docentes en formación en ciencias como se expondrá más adelante.

décimo y once sobre el modelo del campo gravitacional y la ley de gravitación universal se reconoce que dentro de muchos contextos escolares por cuestión de tiempo, planeación y la misma exigencia por el cumplimiento de conceptos que se requieren para las pruebas saber (ICFES) no se tiene en consideración.

Las dificultades expuestas que son propias de los lineamientos dados por el MEN, son evidentes también en la bibliografía de ciencias naturales que suele utilizarse para la preparación de las clases. Desde la propia experiencia, se ha podido evidenciar que en múltiples colegios se ha optado por dejar de lado un texto escolar específico para los estudiantes en la asignatura de física. En diversos casos, este material ha sido reemplazado por el uso de plataformas donde tanto estudiantes como docentes pueden acceder a ciertos recursos. Sin embargo, el uso de estas herramientas no es tomada en consideración por algunos colegios (ya sea por su costo o su irrelevancia en comparación con áreas tales como matemáticas o lengua castellana) de manera que, para la preparación de clases, actividades, talleres, laboratorios, etc; los maestros deben contar con las fuentes de consulta o textos a los que se puede tener acceso libremente por internet, la biblioteca de las instituciones educativas o sus propios medios.

Teniendo en cuenta lo anterior, en algunos de los libros de física que comúnmente son fuentes de consulta importantes para la preparación de las clases, se puede evidenciar que los contenidos que se exponen sobre la ley de gravitación universal específicamente, carecen de profundización en cuanto a su historia y aplicaciones en el campo de la astrofísica¹¹ El primer libro que se consultó fue el Hipertexto Santillana 2011 Física 1 (Véase en: Cuadro 1.1) allí se pudo observar que para abordar la ley de gravitación universal de Newton, se hace previamente una breve mención de los modelos de universo propuestos por Ptolomeo, Copérnico hasta las leyes de Kepler, los cuales están enmarcados por las teorías de la mecánica clásica. Posteriormente, se hace referencia a ley de gravitación, la que además queda reducida a su definición, una ecuación y un ejemplo que se aplica de forma mecánica para dar cuenta de la atracción entre cuerpos. Aunque se realizan algunos aportes respecto a las mareas, la masa inercial y gravitacional no se puede ver

¹¹Es importante mencionar que no sólo hay una reducción de los contenidos presentados en la Ley de gravitación universal, también son evidentes en otros conceptos.

una aplicación dentro del campo de la astrofísica.

2.3 La gravitación universal

2.3.1 La ley de gravitación universal

Los planetas describen una trayectoria elíptica alrededor del Sol y puesto que no describen movimiento rectilíneo uniforme, debe actuar sobre ellos una fuerza centrípeta que produce el cambio en la dirección del movimiento.

Isaac Newton, en el siglo XVII, explicó el origen de esta fuerza en lo que se conoce como ley de gravitación universal.

Definición

Dos cuerpos cualquiera de masas m_1 y m_2 , separados una distancia r se atraen con una fuerza que es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa.


La ley de gravitación universal se expresa como:

$$F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

Donde G se denomina constante de gravitación universal y su valor en el SI es:

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}$$

La fuerza se produce siempre entre dos cuerpos (atracción gravitatoria), pero muchas veces, por su pequeño valor es poco perceptible.



Isaac Newton, explicó la ley de la gravitación universal.

Cuadro 1.1: Fragmento del Hipertexto Santilla Física 1. 2011. Página 155

Otros de los textos que se revisaron fueron los preuniversitarios, que en algunas ocasiones son utilizados como guía para la preparación de las clases de física. En este caso los textos consultados fueron: Fundamentos de Física Vol 1: Serway, Vuille (2012) y Física para ciencias e ingeniería Vol. 1: Giancoli (2008).

7.5 Gravitación newtoniana

Antes de 1686, ya se contaba con una gran cantidad de información relacionada con los movimientos de la Luna y los planetas, pero no había un claro entendimiento de las fuerzas que hacen que estos cuerpos celestes se muevan como lo hacen. En ese año, Isaac Newton dio la clave que abrió los secretos de los cielos. Basándose en su primera ley, Newton sabía que una fuerza neta tenía que estar actuando sobre la Luna porque, de no ser así, ésta se movería en una trayectoria recta, en lugar de la órbita casi circular que describe alrededor de la Tierra. Newton razonó que esa fuerza debía surgir como resultado de una atracción entre la Luna y la Tierra, atracción a la que llamamos fuerza de gravedad, y que es del mismo tipo de fuerza que atrae objetos, como manzanas, cercanos a la superficie de la Tierra.

En 1687 Newton publicó su trabajo sobre la ley de gravitación universal:

Si dos partículas de masa m_1 y m_2 están separadas una distancia r , una fuerza gravitacional actúa a lo largo de la recta que las une, con una magnitud dada por:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad [7.20]$$

donde $G = 6,673 \times 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$ es una constante de proporcionalidad llamada **constante de gravitación universal**. La fuerza gravitacional es siempre de atracción.

Esta ley de la fuerza es un ejemplo de una **ley de los cuadrados inversos**, en el que la fuerza varía en proporción inversa al cuadrado de la distancia que separa a las masas. Por la tercera ley de Newton se sabe que la fuerza ejercida por m_1 sobre m_2 , denotada por \vec{F}_{12} en la figura activa 7.17, es igual en magnitud a la fuerza \vec{F}_{21} ejercida por m_2 sobre m_1 , pero en sentido opuesto, formando un par acción-reacción.

Tabla 7.2 Velocidad de escape para los planetas y la Luna

Planeta	v_{esc} (km/s)
Mercurio	4,5
Venus	10,5
Tierra	11,2
Luna	2,5
Marte	5,0
Júpiter	60,0
Saturnio	36,0
Urano	22,0
Neptuno	24,0
Plutón*	1,1

* En agosto de 2006 la Unión Astronómica Internacional adoptó una definición de planeta que separa a Plutón de los otros cinco planetas. Actualmente a Plutón se le denomina "planeta enano" (como al asteroide Ceres).

Velocidad de escape

Si un objeto es lanzado hacia arriba desde la superficie terrestre con una velocidad suficientemente grande, podría internarse en el espacio exterior y no regresar. A esa rapidez se le conoce como **velocidad de escape** (también suele llamarse *velocidad de escape*, pero es más apropiado usar el término *rapidez*).

La velocidad de escape de la Tierra puede encontrarse aplicando la ley de conservación de la energía. Suponga que un objeto de masa m es lanzado verticalmente hacia arriba desde la superficie terrestre con una velocidad inicial v_i . La energía mecánica inicial (energía cinética más energía potencial) del sistema objeto-Tierra está dada por

$$E_C + E_P = \frac{1}{2} m v_i^2 - \frac{GM_E m}{R_E}$$

Despreciamos la resistencia del aire y suponemos que la velocidad inicial es apenas suficiente para permitir que el objeto llegue al infinito con una velocidad igual a cero. Este valor de v_i es la velocidad de escape v_{esc} . Cuando el objeto está a una distancia infinita de la Tierra, su energía cinética es cero porque $v_f = 0$, y la energía potencial gravitacional es también cero porque $1/r$ tiende a cero cuando r tiende al infinito. De aquí, la energía mecánica total es cero, por lo que, de la ley de la conservación de la energía, se obtiene

$$\frac{1}{2} m v_{\text{esc}}^2 - \frac{GM_E m}{R_E} = 0$$

por lo que

$$v_{\text{esc}} = \sqrt{\frac{2GM_E}{R_E}} \quad [7.22]$$

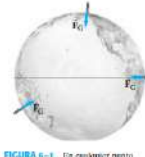
La velocidad de escape para la Tierra es aproximadamente de 11,2 km/s o bien cerca de 25.000 mi/h (véase el ejemplo 7.12). Observe que la expresión para v_{esc} no depende de la masa del objeto lanzado desde la Tierra, así que una nave espacial tiene la misma velocidad de escape que una molécula. En la tabla 7.2 se enlistan la correspondiente velocidad de escape para cada planeta y para la Luna. La velocidad de escape y la temperatura determinan en gran parte si un planeta posee o no una atmósfera y, si es así, cuáles son sus constituyentes. Planetas con baja velocidad de escape, como Mercurio, generalmente no tienen atmósfera porque el promedio de velocidad de sus moléculas de gas es muy cercano a la rapidez de escape. Venus tiene una muy densa atmósfera, pero es casi enteramente dióxido de carbono, un gas muy pesado. La atmósfera de la Tierra tiene muy poco hidrógeno y helio, pero retiene moléculas de gases mucho más pesados como el nitrógeno y el oxígeno.

Cuadro 1.2: Fragmentos del libro: Fundamentos de Física Vol 1: Serway y Vuille (2012)

En el primer libro (Véase en: Cuadro 1.2), se pudo evidenciar mayor profundización en cuanto a la formalización sobre la ley de gravitación universal de Newton, donde en secciones se hace referencia a la energía potencial gravitacional, la velocidad de escape y

una breve descripción de las leyes de Kepler. No obstante, carece de aplicaciones en el campo de la astrofísica.

En el segundo caso (Véase en: Cuadro 1.3), el libro dedica un capítulo completo para dar cuenta de esta ley, denominada: Capítulo 6: Gravitación y síntesis de Newton. A diferencia de los libros descritos anteriormente, puede verse en este texto un poco más detallada la formalización y antecedentes de esta ley. De igual manera, presentan algunas aplicaciones a la geofísica y astronomía, donde dan a conocer la resolución de problemas sobre satélites, además de hacer una descripción sobre la ingravidez. Así mismo, se realiza con más detalle la descripción sobre las leyes de Kepler y se da una breve introducción al concepto de campo gravitacional. Es importante mencionar que al finalizar la sección hay un aparatado denominado: El principio de equivalencia, la curvatura del espacio y los agujeros negros, en el cual se da una pequeña reseña sobre los principios de la teoría general de la relatividad, lo que resulta ser un ítem importante en cuanto a esa aplicación al campo de la astrofísica.

<p>6-1 Ley de Newton de la gravitación universal</p>  <p>FIGURA 6-1 En cualquier punto sobre la Tierra, ya sea Alaska, Australia o París, la fuerza de la gravedad actúa hacia abajo, hacia el centro de la Tierra.</p> <p>Entre sus grandes logros, Sir Isaac Newton examinó el movimiento de los cuerpos celestes: los planetas y la Luna. En particular, se preguntó acerca de la naturaleza de la fuerza que debe actuar para mantener a la Luna en su órbita casi circular alrededor de la Tierra.</p> <p>Newton también reflexionó acerca del problema de la gravedad. Puesto que los cuerpos que caen aceleran, Newton concluyó que debía ejercerse una fuerza sobre ellos, a la cual llamamos fuerza de gravedad. Siempre que una fuerza se ejerce sobre algo, esa fuerza es ejercida por algún otro objeto. Pero ¿qué objeto ejerce la fuerza de gravedad? Todo objeto sobre la superficie terrestre siente la fuerza de gravedad o, independientemente de dónde se encuentre el objeto, la fuerza está dirigida hacia el centro de la Tierra (figura 6-1). Newton concluyó que debe ser la Tierra misma la que ejerce la fuerza gravitacional sobre los objetos que están en su superficie.</p> <p>Según la antigua anécdota, Newton notó la caída de una manzana de un árbol. Se dice que tuvo una repentina intuición: si la gravedad actúa en la parte superior de los árboles e incluso en la cima de las montañas, entonces ¿qué actúa todo el camino hasta la Luna? Con esta idea de que la gravitación terrestre es lo que mantiene a la Luna en su órbita, Newton desarrolló su gran teoría de la gravitación. Pero en aquel entonces se suscitó una controversia. Muchos pensadores se rehusaban a aceptar la noción de una fuerza "que actúa a distancia". Las fuerzas típicas actúan por contacto, es decir, su mano empuja un carrito o jala una caja, un bate golpea una pelota, etcétera. No obstante, dijo Newton, la gravedad actúa sin contacto: la Tierra ejerce una fuerza sobre una manzana que está y sobre la Luna, aun cuando no haya contacto, y los dos objetos pueden incluso estar muy lejos entre sí.</p> <p>Newton se propuso determinar la magnitud de la fuerza gravitacional que la Tierra ejerce sobre la Luna en comparación con la fuerza gravitacional que la Tierra ejerce sobre objetos en la superficie terrestre, donde la fuerza de la gravedad acelera los objetos a 9.80 m/s^2. La aceleración centrípeta de la Luna se calcula con $a_c = v^2/r$ (véase el ejemplo 5-9) y resulta $a_c = 0.00272 \text{ m/s}^2$. En términos de la aceleración de la gravedad en la superficie de la Tierra, g, esto equivale a</p> $a_c = \frac{0.00272 \text{ m/s}^2}{9.80 \text{ m/s}^2} g \approx \frac{1}{3600} g$ <p>Es decir, la aceleración de la Luna hacia la Tierra es aproximadamente $\frac{1}{3600}$ de la aceleración de los objetos en la superficie terrestre. La Luna está a $384,000 \text{ km}$ de la Tierra, lo cual es casi 60 veces el radio de la Tierra o 6380 km. Entonces, la Luna está 60 veces más alejada del centro de la Tierra que los objetos en la superficie terrestre. Pero $60^2 = 3600$. De nuevo el número 3600! Newton concluyó que la fuerza gravitacional F ejercida por la Tierra sobre cualquier objeto decrece con el cuadrado de su distancia r desde el centro de la Tierra:</p> $F \propto \frac{1}{r^2}$ <p>La Luna está a una distancia de 60 radios terrestres, por lo que siente una fuerza gravitacional de sólo $\frac{1}{3600} = \frac{1}{60^2}$ de la fuerza gravitacional que sentiría si fuera sólo un punto sobre la superficie de la Tierra.</p> <p>Newton se dio cuenta de que la fuerza de gravedad sobre un objeto depende no sólo de la distancia, sino también de la masa del objeto. De hecho, es directamente proporcional a su masa, como ya hemos visto. De acuerdo con la tercera ley de Newton, cuando la Tierra ejerce su fuerza gravitacional sobre cualquier cuerpo, por ejemplo, sobre la Luna, ese objeto ejerce una fuerza de la misma magnitud pero de sentido opuesto sobre la Tierra (figura 6-2). Debido a tal simetría, Newton razonó que la magnitud de la fuerza de la gravedad debe ser proporcional a ambas masas. Así,</p> $F \propto \frac{m_1 m_2}{r^2}$ <p>donde m_1 es la masa de la Tierra, m_2 es la masa del otro objeto y r es la distancia del centro de la Tierra al centro del otro objeto.</p>	<p>*6-8 El principio de equivalencia, la curvatura del espacio y los agujeros negros</p> <p>Hemos tratado con dos aspectos de la masa. En el capítulo 4, definimos masa como una medida de la inercia de un cuerpo. La segunda ley de Newton relaciona la fuerza que actúa sobre un cuerpo con su aceleración y con su masa inercial, que es como la conocemos. Podríamos decir que la masa inercial representa una resistencia a cualquier fuerza. En este capítulo hemos tratado con la masa como una propiedad relacionada con la fuerza gravitacional, es decir, la masa como una cantidad que determina la intensidad de la fuerza gravitacional entre dos cuerpos. A ésta la llamamos masa gravitacional.</p> <p>No es evidente que la masa inercial de un cuerpo debiera ser igual a su masa gravitacional. (La fuerza de gravedad podría haber dependido de una propiedad completamente diferente de un cuerpo, así como la fuerza eléctrica depende de una propiedad llamada carga eléctrica.) Los experimentos de Newton y de Cavendish indicaron que esos dos tipos de masa son iguales para un cuerpo, y los experimentos modernos lo confirman con una precisión de aproximadamente 1 parte en 10^{12}.</p> <p>Albert Einstein (1879-1955) llamó principio de equivalencia a esta equivalencia entre las masas gravitacional e inercial, y lo usó como base para su <i>teoría general de la relatividad</i> (c. 1916). Es posible enunciar el principio de equivalencia de otra manera: no hay ningún experimento que pueda efectuar un observador para distinguir si una aceleración surge debido a una fuerza gravitacional o si surge debido a que el marco de referencia del observador esté acelerando. Si, por ejemplo, usted estuviera en el espacio y una manzana cayera al piso de su nave espacial, supondría que una fuerza gravitacional actúa sobre la manzana. Pero también sería posible que la manzana cayera debido a que su nave espacial estuviera acelerando hacia arriba (con respecto a un sistema inercial). Los efectos serían indistinguibles de acuerdo con el principio de equivalencia, ya que las masas inercial y gravitacional de la manzana, que determinan cómo "reacciona" un cuerpo ante influencias externas, no son distinguibles entre sí.</p>
---	--

Cuadro 1.3: Fragmentos del libro: Física para ciencias e ingeniería Vol. 1: Giancoli (2008)

En estos textos consultados se ha evidenciado que las temáticas expuestas quedan limitadas también en cuanto a la historia se refiere, en ese sentido afirma Kuhn (1962) que

“si se considera a la historia como algo más que un depósito de anécdotas o cronología, puede producir una transformación decisiva de la imagen que tenemos actualmente de la ciencia” (p.20). Por ello, puede verse que esta percepción que se tiene de las ciencias y que se lleva al aula dista mucho de aquella que está en constante construcción y reconstrucción, que yace además de una actividad cultural. Así pues, “es inevitable que la finalidad de esos libros sea persuasiva y pedagógica; un concepto de la ciencia que se obtenga de ellos no tendrá más probabilidades de ajustarse al ideal que los produjo.” (Kuhn, 1962).

Lo expuesto anteriormente, conduce a que se genere un desconocimiento de otros campos de saber que pueden emerger de las ciencias exactas y su impacto en el desarrollo de los avances científicos que se han realizado gracias al estudio de estas. Sin embargo, es clave aclarar que esta situación no es exclusiva de los contextos escolares, pues dentro de las instituciones de educación superior algunas temáticas se limitan a conocimientos básicos y repetitivos, carentes de profundización en nuevos temas que actualmente se estudian. Esta problemática que se ha hecho extensiva a universidades tales como: La Universidad Pedagógica Nacional, Universidad Nacional de Colombia, Universidad Distrital, Universidad de Antioquia, entre otras; intentan desde sus espacios de formación de pregrados y posgrados, crear y ejecutar algunas propuestas frente a la enseñanza de la física moderna en la escuela que permiten además considerar la astronomía y la astrofísica como una herramienta fundamental que contribuye a fortalecer el deseo de saber y aprender del estudiante, y enriquecer la mirada pedagógico-didáctica, disciplinar y epistemológica del profesor (Pedreros y Zamora, 2014).

Desde esta perspectiva es clave reconocer que, la enseñanza de la física en la educación secundaria y media en Colombia es un campo que requiere abrir nuevas perspectivas las cuales permitan tanto a maestros como a estudiantes a reflexionar sobre el carácter de las ciencias, la actividad científica y la elaboración de las teorías. Lo anterior, desplaza la mirada que se tienen en algunas escuelas de la física (de acuerdo con la propia experiencia), pasando de ser una materia que precisa de elementos de orden algebraico, “mecánico” a la cual acceden solo un grupo especializado de personas, a entender que puede ser asequible para todos al ser parte indiscutible de la interacción humana. En este sentido, afirma Ayala (2016) este abordaje implica reconocer que el conocimiento de la física no

ha estado dado como una verdad absoluta realizada por genios en la historia, por el contrario, permite

(...) conocer, entonces, los problemas que han posibilitado la formación y el desarrollo de los conceptos de la física, las condiciones en que tales problemas se plantean, las respuestas y formas de abordarlos que se han elaborado, la forma como evolucionan los conceptos, los elementos comunes y las diferencias básicas entre las diferentes teorías, etc. La dinámica de los problemas y conceptos rompe con la organización de la ciencia en teorías, la física como actividad comienza a plantearse como objeto de estudio en los cursos de física y el carácter dinámico e histórico de la física adquiere una gran relevancia.
(p.25)

Por esta razón, la apuesta que se ha realizado desde la formación de docentes en física ha sido a través de la elaboración de propuestas encaminadas a la enseñanza de la física moderna en la escuela colombiana. En este punto, es clave señalar algunos de estos trabajos de grado que han planteado actividades que apuestan a la enseñanza de la astrofísica, la mecánica cuántica y la relatividad. Entre estos, se encuentra el trabajo realizado por Torres, C. (2018) “*Aportes a la enseñanza de la física moderna desde el análisis histórico del texto original de Stephen Hawking, breve historia del tiempo: del big bang a los agujeros negros*”¹²; que realiza un análisis histórico-crítico del capítulo I del texto de Hawking y algunas observaciones sobre las implicaciones didácticas de llevarlas a la escuela. Para Torres este tipo de trabajos contribuyen a situar estos conocimientos en el aula que son propios de la física moderna dentro de los estándares del MEN sin el nivel de formalización matemática que implicaría desde el contexto disciplinar. De este modo afirma el autor que “ (...) las temáticas de física moderna no son tan complejas ni se alejan tanto de nuestra realidad como parece indicar la literatura” (Torres, 2018).

Así mismo, el trabajo realizado por Macías, C. (2014). “*La experimentación mental*

¹²Trabajo de grado de la Licenciatura en Educación Básica con Énfasis en Ciencias Naturales y Educación Ambiental de la Universidad del Valle – Colombia Recuperado de: [URLhttps://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/14254/CB-0597262.pdf?sequence=1](https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/14254/CB-0597262.pdf?sequence=1)

en la formación de maestros de ciencias: *Una alternativa para la enseñanza de la física moderna en la escuela*¹³; diseña y aplica una propuesta pedagógica orientada a los estudiantes de licenciatura en física y matemáticas respecto a los experimentos mentales orientados en los principios de la Teoría Especial de la Relatividad. Aquí, la autora demuestra cómo puede el experimento mental ser una alternativa para aproximar a los docentes en formación a la física moderna, además de reconocer esta estrategia didáctica como óptima para la enseñanza de la relatividad. De igual modo, se realiza varias reflexiones importantes en torno a la epistemología de la física moderna y la posibilidad de hacer esta herramienta extensiva a otras ramas de la física como la mecánica cuántica.

Por último, el trabajo elaborado por Erick Ortiz (2017) *“Los conceptos del espacio-tiempo entre Newton y Einstein para la enseñanza de la física”*¹⁴, resalta el estudio de estos conceptos mediante una revisión histórica-crítica de los trabajos de Newton y Einstein, en la cual propone implementar algunos elementos referentes a la comprensión de la Teoría de la relatividad especial con estudiantes de grado undécimo. En este trabajo se evidencia con detalle, la manera en que se diseñan las actividades para los estudiantes, así como las reflexiones realizadas al aplicarlas. De igual manera, el autor comenta que es posible la enseñanza de la relatividad mediante esta estrategia si se toma desde una perspectiva conceptual.

Lo anterior, son sólo algunas de las múltiples propuestas que se han elaborado en el marco de la enseñanza de la física moderna en Colombia¹⁵. Estas iniciativas permiten reconocer que la astrofísica en la escuela -más específicamente en la educación básica y media- puede ser viable si se propician los espacios adecuados para su enseñanza, los

¹³Trabajo de grado de la Licenciatura en física y matemáticas de la Universidad de Antioquia-Colombia. Recuperado de: <http://ayura.udea.edu.co:8080/jspui/bitstream/123456789/661/1/JD0886.pdf>

¹⁴Trabajo de grado de la maestría en docencia de las ciencias naturales de la Universidad Pedagógica Nacional. Recuperado de: <http://repository.pedagogica.edu.co/bitstream/handle/20.500.12209/13006/T0-20683.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

¹⁵Es importante aclarar que la problemática sobre la enseñanza de la física moderna no es exclusiva de Colombia. A nivel mundial, algunas instituciones, observatorios y universidades han procurado realizar propuestas en las cuales abordan la enseñanza de la astrofísica en la escuela e incluso para la población en general.

cuales deben estar acordes a las necesidades y al contexto particular al que se llevará a cabo la propuesta didáctica. Así mismo, invita a reflexionar sobre la importancia de seguir potencializando este área del conocimiento en las instituciones de educación superior, para que pueda generarse una profundización rigurosa en torno a la investigación de esta disciplina y, por ende, un avance en el campo de la enseñanza de la astronomía y específicamente, de la astrofísica.

El reto como docentes se enmarca en la necesidad de buscar estrategias que permitan innovar y transformar los escenarios educativos, para responder a esas exigencias del mundo contemporáneo en la que vivimos docentes y estudiantes. Por ende, propiciar espacios para la enseñanza de las ciencias naturales implica estar a la par con los avances del mundo actual donde es imperativo agenciar y potenciar la enseñanza de este campo de conocimiento en nuestro país. Configurar la mirada sobre la enseñanza de las ciencias naturales genera que los estudiantes desarrollen su criticidad y sus procesos analíticos y reflexivos, a la vez que contribuye a la construcción de sociedades más justas, democráticas y sostenibles en donde la educación, el acceso al conocimiento y la divulgación científica sean principios de carácter universal para todos y todas.

Incluso, puede ser la astronomía esa “excusa” para acercar a nuestros estudiantes al campo de las ciencias, “llevarla hasta las aulas, a través de la creación y difusión de recursos educativos, busca aprovechar esa característica, convirtiéndola en una puerta de entrada a otras áreas del conocimiento”¹⁶ puesto que, “astronomy excites the imagination. The beauty of the night sky and its rhythms are at once stunning and compelling. The boldness of our collective efforts to comprehend the universe inspires us, while the dimensions of space and time humble us.” [la astronomía despierta la imaginación. La belleza del cielo nocturno y sus ritmos son al mismo tiempo impresionantes y cautivadores. La audacia de nuestros colectivos en el esfuerzo por comprender el universo nos inspira, mientras que las dimensiones del espacio y el tiempo nos hacen humildes] (National Research Council, 2001).

¹⁶Comunicado de prensa de CONICYT (2019) sobre la quinta versión de la “cumbre de Educación y difusión de la astronomía” en Temuco-Chile. Recuperado de: <https://www.conicyt.cl/astroeducacion2019/files/2019/08/20190903-COMUNICADO-Cumbre-Temuco21.pdf>

Bajo las consideraciones expuestas anteriormente, se plantea así la siguiente pregunta que orienta el presente trabajo de grado:

¿Qué criterios epistemológicos, teóricos, pedagógicos y didácticos aportan a la configuración de una propuesta de aula para abordar la enseñanza de los agujeros negros en la educación media?

De igual manera, se propone otra pregunta subsecuente a la principal:

- ¿Cómo se puede aproximar a los estudiantes a identificar las características de la física del agujero negro?

1.2. Objetivo General:

Determinar algunos criterios epistemológicos, teóricos, pedagógicos y didácticos que aportan a la configuración de una propuesta de aula para abordar la enseñanza de los agujeros negros en la educación media.

1.2.1. Objetivos específicos:

- Establecer algunos elementos de orden teórico presentes en el estudio de la física de agujeros negros.
- Reconocer las perspectivas históricas y epistemológicas alrededor de los agujeros negros desde una mirada clásica (Ley de gravitación universal) y relativista (Relatividad general).
- Describir las características de los agujeros negros mediante los avances realizados en el campo de la astrofísica, mostrando los mecanismos de su formación a través de la evolución estelar, su estructura, clasificación y detección.
- Identificar aspectos pedagógicos a través de la descripción, análisis y reflexión de algunas perspectivas relacionadas con la enseñanza y la didáctica de la astronomía.
- Diseñar una propuesta de aula que permita acercar a los estudiantes al campo de la astrofísica especialmente a los agujeros negros, partiendo de criterios teóricos, epistemológicos, pedagógicos y didácticos.

Capítulo 2

Gravedad y Luz

En este capítulo se abordan algunos elementos de orden histórico y teórico acerca de los conceptos que se consideran relevantes resaltar en la explicación física de los agujeros negros, los cuales son la gravedad y la luz, que se contemplan indispensables para determinar los criterios teóricos y epistemológicos para su enseñanza. En ese sentido, se precisa en primer lugar realizar una descripción de las teorías de gravitación desde la mirada de la ley de gravitación universal de Isaac Newton y la teoría general de la relatividad propuesta por Albert Einstein. Finalmente, se desarrollan de manera global diversos aspectos sobre la naturaleza de la luz, la medida de su velocidad y algunos estudios que relacionan la gravitación con la luz la cual tiene a tener una trayectoria curva desde la perspectiva relativista.

2.1. Teorías de gravitación

Una de las posibilidades sobre la formación de los agujeros negros, emerge del resultado extremo de la gravedad triunfante (en comparación con la presión) dentro de una estrella en sus fases finales de evolución. Por ello, se hace necesario vislumbrar dos perspectivas de su naturaleza: La ley de gravitación universal de Isaac Newton y la teoría de la relatividad general propuesta por Albert Einstein.

2.1.1. La fuerza gravitacional de Newton

“Nature, and Nature’s laws lay hid in night.

God said, Let Newton be! and all was light”

Alexander Pope, 1730

Isaac Newton (1643-1727) es considerado como uno de los científicos más importantes de todos los tiempos por sus contribuciones al cálculo infinitesimal, la mecánica, la óptica, entre otras contribuciones. Su genialidad lo llevó a crear una de las obras más brillantes en la historia de las ciencias: Los principios. Esta obra, tal como lo destaca Hawking (2004) “fundió las contribuciones científicas de Copérnico, Galileo, Kepler y otros en una gran sinfonía dinámica” (p. 380), lo cual permitió, además, instaurarse como un fundamento científico crucial en línea con una nueva mirada moderna del mundo. El avance de explicaciones más eficientes desde los fundamentos de la dinámica que realiza a través del conjunto de las fuerzas de la naturaleza (Eisenstaedt, 2015), permitió fijar las bases de la mecánica. Esto tuvo un impacto significativo en la humanidad no sólo a las múltiples aplicaciones que se derivaron de allí, también al avance de la misma teoría a partir de la formalización matemática. Tales leyes de movimiento, se enmarcan en la sección: “Axiomas o leyes del movimiento”, donde Newton realiza una descripción de cada una de ellas. Estos principios se establecen mediante las siguientes leyes:

Ley Primera: Todo cuerpo persevera en su estado de reposo o movimiento uniforme y rectilíneo a no ser en tanto que sea obligado por fuerzas impresas a cambiar su estado.

Ley Segunda: El cambio de movimiento es proporcional a la fuerza motriz impresa y ocurre según la línea recta a lo largo de la cual aquella fuerza se imprime.

Ley Tercera: Con toda acción ocurre siempre una reacción igual y contraria: O sea, las acciones mutuas de dos cuerpos siempre son iguales y dirigidas en direcciones opuestas. (Sánchez, 2009, pp. 206-208)

Con ello es importante mencionar que, los estudios realizados por Newton subyacen de los análisis realizados por Galileo Galilei en el siglo XVII, así como los de Johannes Kepler,

René Descartes y especialmente los de Edmond Halley. Así mismo es clave reconocer que, aunque estas leyes serían fundamentales en la explicación del movimiento de los cuerpos, fueron estos principios de la dinámica los que conducirían a la posibilidad de establecer una fuerza de atracción; la cual fue expuesta en el libro tercero denominado “sobre el sistema del mundo”. Allí, Newton afirmó que: “cualquier cuerpo ejerce una fuerza sobre otro proporcional al producto de sus masas interactuantes e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa”, lo cual se conoce como la ley de gravitación universal (Cardona, 2012)¹. Esta ley, se expresa matemáticamente como:

$$\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{u} \quad (2.1)$$

En esta ecuación (2.1), G representa la constante de gravitación universal², m_1 y m_2 las masas que se atraen entre sí, r la distancia que las separa, \vec{u} el vector unitario que apunta radialmente hacia fuera de los cuerpos (Véase en: Figura 2.1) y el signo negativo indica su carácter atractivo. En este caso, “the force is assumed to be gravitational in nature, and to originate from a gravitating mass situated at the origin of the coordinate

¹Es importante mencionar que, el estudio de Newton sobre los principios de la dinámica aplicados a cuerpos celestes fue realizado en 1682. Esto, tras el hallazgo de un cometa en noviembre de 1682 por parte del astrónomo real John Flamsteed. Así mismo, se destaca dentro de la historia la pregunta efectuada por Halley en agosto de 1684: ¿Qué curva describirían los planetas, suponiendo que la fuerza de atracción hacia el Sol fuera recíproca al cuadrado de su distancia a él?, a la cual Newton responde: una elipse. No obstante, se dice que al no encontrar sus demostraciones en la biblioteca, redactó un pequeño tratado denominado: *De motu corporum in gyrum* «De Montu», en la cual aparece no únicamente la demostración de las órbitas elípticas de los planetas, también de las dos leyes de Kepler. Por otro lado, Robert Hooke (Físico inglés) pretendía tener una explicación al suponer que la fuerza de atracción era inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. De ahí que, se deriva una de las controversias más destacadas dentro de la historia de las ciencias. Véase en: Eisenstaedt, J. (2015). “Antes de Einstein: Relatividad, luz y gravitación” Editorial: Fondo de cultura económica. Capítulo IV: La luz el los principia.

²Es relevante aclarar que, Newton no estableció la constante de gravitación universal. La primera medida directa de la atracción entre dos cuerpos, fue realizada en 1798 por Henry Cavendish a través de la balanza de torsión creada por John Michell. Véase en: Cavendish, H. (1798). *Experiments to Determine the Density of the Earth*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 88, 469–526. Recuperado de: <http://www.jstor.org/stable/106988>. Una versión modificada de este experimento fue realizado por Charles Boys en 1895. Véase en: Boys, C. (1895). *On the Newtonian constant of gravitation*. *Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 186, 1-72. Recuperado de: <https://royalsocietypublishing.org/doi/epdf/10.1098/rsta.1895.0001>

system” [se supone que la fuerza es de naturaleza gravitacional y que se origina en una masa gravitatoria situada en el origen del sistema de coordenadas.](Poison y Will, 2014, p.03).

Por ende, la masa m_1 que se ubica en el origen de coordenadas se encuentra pasiva a una distancia \mathbf{r} respecto a la masa del segundo cuerpo m_2 que termina siendo atraída por aquella que se encuentra en reposo (Poison y Will, 2014). De ahí que, el carácter atractivo de la gravedad implica la proporcionalidad entre los cuerpos, pues entre más masivas sean estas, mayor será su fuerza de gravedad entre los cuerpos que interactúan. Considerar la separación entre ellas será fundamental, puesto que la relación inversamente proporcional de la distancia (r^2) implica que al estar más lejanas una sobre la otra, menor será la fuerza de atracción entre los cuerpos que interactúan.

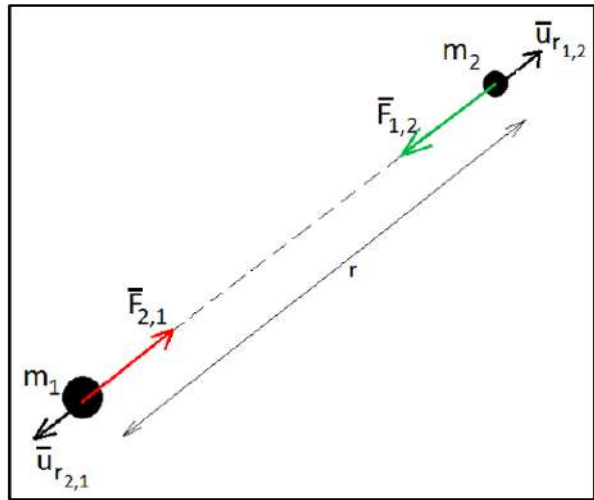


Figura 2.1: Representación de la fuerza de atracción gravitacional de dos masas. Tomada de: https://www.uv.es/jmarques/_private/Campogravitatorio.pdf

En este orden de ideas, es significativo reconocer la relevancia de la obra de Newton puesto que radica en la configuración de la mirada de la física que se tenía hasta ese momento, la cual se encontraba en línea con la física elaborada por los griegos. Si bien la geometría era fundamental en la explicación de algunos fenómenos para los científicos en ese momento, la elaboración de modelos matemáticos desde las cuales se comparaban, permitió tener perspectivas más amplias desde donde surgían nuevas versiones de los modelos previos. Por ende, afirma Sánchez (2009) “nunca volvería la humanidad a mirar al Universo de la manera en que lo había hecho hasta entonces” (p. 209); pues Newton convirtió la matemática en la esencia principal de las teorías físicas (Sánchez, 2009).

Así mismo, la ley de gravitación universal traía consigo algunos interrogantes fundamentales que emergen especialmente de su naturaleza, ya que no era producto de una fuerza por contacto tal como la tensión o la fricción. Por el contrario, su interacción de acción a distancia no precisaba de ningún vínculo para accionarse. Esto, era incongruente con la visión mecanicista del universo de René Descartes³ e incluso con la de Newton, quien lo consideraba un artificio matemático que le permitía calcular los movimientos de los cuerpos más que como una magnitud con realidad física.⁴

Según Roger Penrose (2016), en el periodo en medio de la obra de Newton (Los principios, 1687) y la publicación de Einstein (La relatividad especial, 1905) se realizaron diversos estudios que generaron importantes desarrollos en cuanto a ciertos conceptos de la física, entre los que se encuentran el *campo*. El avance en la comprensión de esta noción, deriva de los trabajos realizados por Michael Faraday y James Clerk Maxwell en el siglo XIX, quienes dedujeron que el campo físico “(...) que impregna el espacio, debe coexistir con la previamente aceptada «realidad newtoniana» de las partículas individuales que interaccionan por medio de fuerzas instantáneas” (Penrose, 2016, p. 1478). Lo anterior, permitió explicar tanto los fenómenos gravitacionales como los electromagnéticos, puesto que, configuró la idea de la interacción a distancia mediante una acción extendida por todo el espacio. De igual manera, se convirtió en un elemento primordial dentro de la cual fue posible aterrizar el concepto de gravitación que se expone en la teoría general de la relatividad de Einstein.

Por otro lado, es importante reconocer que la relación entre la masa y distancia de los

³De acuerdo con Luminet (1991) La visión mecanicista de Descartes se expuso en su obra “Principia Philosophiae” publicado en 1644, la cual sentó además las bases de la ciencia moderna.

⁴El 25 de febrero de 1692 Newton escribió a Richard Bentley (quien publicaría la segunda edición de los principios), una carta donde le describía sus apreciaciones respecto a la acción a distancia: “(...) Que la gravedad sea innata, inherente y esencial a la materia de forma que un cuerpo pueda actuar a distancia a través de un vacío sin la mediación de otra cosa con la cual su acción o fuerza puede ser transmitida de [un lugar] a otro, es para mí algo tan absurdo que no creo que pueda caer en ella ninguna persona con facultades competentes de pensamiento en asuntos filosóficos(...)”. Véase en: Sánchez, R. (2015) “Albert Einstein: Su vida, su obra y su mundo”. Fundación BBVA. Barcelona-España. Editorial planeta. Capítulo I: La Física clásica I: La Dinámica de Newton.

cuerpos que determina la ley de gravitación universal, permitió desarrollar la mecánica celeste, la cual fue clave en el auge de la astronomía moderna⁵ En este contexto, afirma (Poison y Will, 2014):

The gravitational theory of Newton is an extremely good representation of gravity for a host of situations of practical and astronomical interest. It accurately describes the structure of the Earth and the tides raised on it by the Moon and Sun. It gives a detailed account of the orbital motion of the Moon around the Earth, and of the planets around the Sun.” [La teoría gravitacional de Newton es una representación extremadamente buena de la gravedad para múltiples situaciones de interés práctico y astronómico. Describe con precisión la estructura de la Tierra y las mareas que provocan en ella la Luna y el Sol. Da cuenta con detalle del movimiento orbital de la Luna alrededor de la Tierra y de los planetas alrededor del Sol.](pp. 01-02)

De ahí que, afirma Cardona (2012) “(. . .) desde Newton la astronomía había conseguido la mayoría de edad y ocupado el lugar que le correspondía dentro del amplio abanico de las ciencias (. . .)” (p. 181), puesto que, a partir de su estudio fue posible realizar predicciones del comportamiento de los planetas, estrellas, entre otros; y que abrió paso a un nuevo campo de investigación, la mecánica celeste. De igual manera, es significativo resaltar que tanto la mecánica clásica de Newton, así como la teoría electromagnética propuesta por Maxwell años más adelante, se consideraron como dos pilares fundamentales en el desarrollo de las ciencias físicas y, por tanto, de la astrofísica gracias a las explicaciones y elaboraciones cada vez más profundas sobre los fenómenos astronómicos.⁶

⁵La astronomía moderna emerge en la época del renacimiento, mediante el modelo heliocéntrico de Nicolás Copérnico. Ésta se impulsa con la llegada de las leyes de la dinámica de Newton y los avances en los instrumentos de observación como los telescopios. El estudio de los fenómenos astronómicos tenían ahora relación entre las leyes de la física (mecánica celeste) y la observación.

⁶Se resalta la teoría electromagnética de luz de Maxwell y la mecánica Newtoniana, puesto que el estudio de la electrodinámica, presentó algunas dificultades respecto a las ideas sobre el éter y la velocidad de la luz, las cuales retomó Einstein para establecer su teoría de la relatividad especial. Véase en: Sánchez, J (1983). “Origen y desarrollo de la relatividad” Capítulo II: El estado de la electrodinámica con anterioridad a Lorentz y Einstein.

2.1.2. La gravedad: ¿Un efecto de la curvatura espacio-temporal?

“(...) the gravitational field influences and even determines the metrical laws of the space-time continuum. (...)”

Albert Einstein, 1922.

En el año 1905 Albert Einstein publica cuatro artículos, los cuales aportaron significativamente al campo de la física y abrieron el camino al mundo de la denominada física moderna. En la primera publicación de su artículo denominado: “Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt” [Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz]⁷, aporta significativamente en el campo de la mecánica cuántica, a través de la idea sobre los cuantos de energía mediante el efecto fotoeléctrico. El segundo artículo titulado “Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen” [Sobre el movimiento de partículas suspendidas en líquidos en reposo exigido por la teoría cinético-molecular del calor]⁸, explica a través de la aplicación de la física estadística el movimiento molecular de la materia llamado *movimiento browniano*. Estos trabajos orientados al análisis del mundo atómico, fueron de gran relevancia en el auge que tuvo la mecánica cuántica a inicios del siglo XX, a través de los estudios que ya realizaba el físico alemán Max Planck.⁹

Posteriormente, Einstein publica un artículo denominado “Zur Elektrodynamik bewegter Körper” [Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento]¹⁰ el cual resolvía

⁷Fue recibido el 18 de marzo y publicado el 9 de junio de 1905 en *Annalen der Physik*. Recuperado de: http://myweb.rz.uni-augsburg.de/~eckern/adp/history/einstein-papers/1905_17_132-148.pdf

⁸Recibido el 11 de mayo y publicado el 18 de julio de 1905 en *Annalen der Physik*. Recuperado de: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/andp.19053220806>

⁹Es relevante mencionar que a finales de siglo XIX e inicio del siglo XX, el físico alemán Max Planck introdujo algunas ideas sobre la teoría cuántica a través de sus estudios realizados sobre la radiación de cuerpo negro. En el año 1918 gana el premio nobel de física: “The Nobel Prize in Physics 1918 was awarded to Max Karl Ernst Ludwig Planck *“in recognition of the services he rendered to the advancement of Physics by his discovery of energy quanta.”*” <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1918/summary/>

¹⁰Recibido el 30 de junio y publicado el 26 de septiembre de 1905 en *Annalen der Physik*. Recuperado

algunos problemas entre la electrodinámica en relación con la mecánica newtoniana.¹¹ Este trabajo fue determinante en cuanto a la mirada que se daba respecto a algunos conceptos que dentro de la física parecían ya estar fijados como: el espacio, el tiempo y, por tanto, el movimiento. De hecho, allí se realizan algunas apreciaciones referentes a la constancia de la velocidad de la luz, las mediciones de la longitud (que Lorentz denominaría contracción de longitudes) y la duración de los eventos (dilatación del tiempo). En este sentido, asegura Eisenstaedt (2015) que:

(...) Einstein muestra que la “contracción de longitudes” y la “dilatación del tiempo” se relacionan con la imposibilidad de atribuir un significado absoluto al concepto de simultaneidad: “Dos acontecimientos que sean simultáneos desde el punto de vista de un sistema de coordenadas no pueden considerarse simultáneos si se ven desde otro sistema de coordenadas en movimiento respecto al primero. (p.191)

Con ello, establece dos principios los cuales serían fundamentales para entender estas reflexiones y los cuales se convertirían en los postulados de su teoría:

1. Die Gesetze, nach denen sich die Zustände der physikalischen Systeme ändern, sind unabhängig davon, auf welches von zwei relativ zueinander in gleichförmiger Translationsbewegung befindlichen Koordinatensystemen diese Zustandsänderungen bezogen werden. [Las leyes de acuerdo a las cuales cambian los estados de los sistemas físicos no dependen de si estos cambios de estado se refieren a uno u otro de dos sistemas de coordenadas que se encuentran en movimiento relativo de traslación uniforme.]

2. Jeder Lichtstrahl bewegt sich im “ruhenden” Koordinatensystem mit der bestimmten Geschwindigkeit V , unabhängig davon, ob dieser Lichtstrahl von einem ruhenden oder bewegten Körper emittiert ist. [Todo rayo luminoso

de: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/andp.19053221004>

¹¹Es importante mencionar que, la Real Academia Sueca de las ciencias, condecoró a Einstein con el nobel de física de 1921 por sus trabajos referentes al efecto fotoeléctrico: “*for his services to Theoretical Physics, and especially for his discovery of the law of the photoelectric effect.*” <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1921/summary/>

que se propaga en un sistema de coordenadas en “reposo” con una velocidad (V) determinada, es independiente de si este rayo de luz ha sido emitido por un cuerpo en reposo o en movimiento] (Einstein, 1905, p. 895).¹²

En este punto es importante mencionar que, Einstein toma en consideración estos dos planteamientos para poder realizar el análisis con respecto a la electrodinámica. Con ello deduce que las cantidades del campo eléctrico dependen del marco de referencia, lo cual quiere decir que dependen del estado de movimiento en el que se encuentren (Sánchez, 2008).

Tiempo después Einstein publica su último artículo: “Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?” [¿Depende de la inercia de un cuerpo su contenido energético?]¹³, en el cual realiza un análisis sobre la equivalencia entre la masa y la energía que más adelante sería la base de la energía nuclear. En este trabajo, articula el principio de la relatividad y la energía cinética de un cuerpo. De esta manera, afirma Sánchez (2015) que, “una minúscula cantidad de masa contiene una increíble cantidad de energía” (p.349); lo cual posteriormente pudo ser estudiado a profundidad dentro de la física nuclear. El aporte fundamental de estos estudios, fue precisamente la consolidación de la Teoría de la Relatividad Especial, que se destacó a principios del siglo XX en la física moderna. Especialmente, este trabajo proporcionaba una explicación congruente con respecto a velocidades cercanas a la de la luz. No obstante, cuando estas eran menores que la velocidad de la luz, tal “cinemática de Einstein” se aproximaba a la Newtonina (Eisenstaedt, 2015).

Por otra parte, para Einstein resulta significativo poder aplicar esta teoría a la gravedad. De ahí que, en 1907, realiza un acercamiento frente a los campos gravitacionales mediante la cuestión: “Ist es denkbar, daß das Prinzip der Relativität auch für Systeme gilt, welche relativ zueinander beschleunigt sind?” [¿Es concebible que el principio de la

¹²Traducción tomada de: <http://webs.ftmc.uam.es/juancarlos.cuevas/Teaching/articulo-original.pdf>

¹³Recibido el 27 septiembre y publicado el 21 de noviembre de 1905 en *Annalen der Physik*. Recuperado de: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/andp.19053231314>

relatividad se aplique también para los sistemas que son acelerados respecto a otros?]¹⁴ (p.454). Con ello, plantea el principio de equivalencia (Véase en: Figura 2.2) que le permite llegar a una generalización del principio de relatividad el cual, expone años más adelante a través de la teoría general de la relatividad. Análogo a la relatividad especial, la gravitación podía ser aplicada a campos gravitatorios débiles. Allí, era posible explicar estos fenómenos desde el marco clásico de Galileo y Newton.

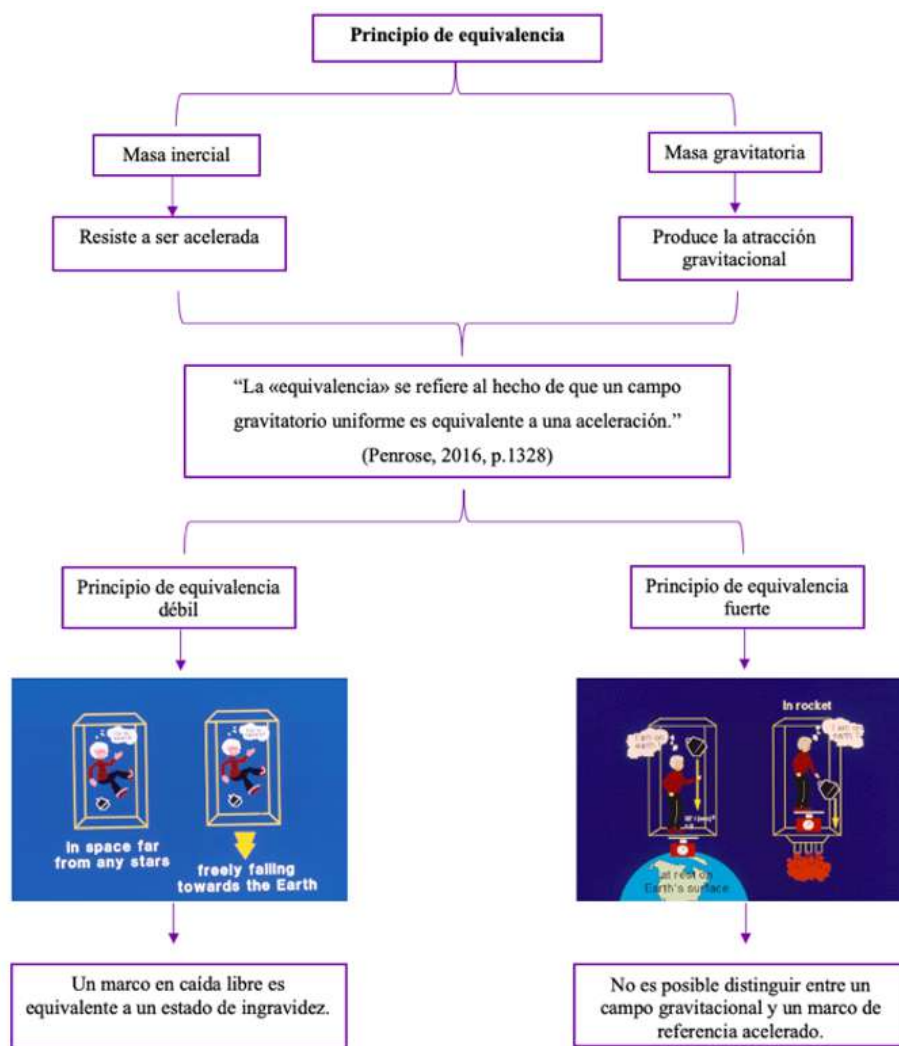


Figura 2.2: Principio de equivalencia, denominada como uno de los experimentos mentales fundamentales para Einstein, ya que le permitió sentar las bases de la relatividad general. Imágenes tomadas de: <http://astro.physics.sc.edu/selfpacedunits/Unit57.html>

¹⁴Del artículo: Einstein, A. (1907). "Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen." Recuperado de: <https://www.fisica.net/relatividade/Einstein/Uber-das-Relativitatsprinzip-und-die-aus-demselben-gezogenen-Folgerungen.pdf>

Este principio de equivalencia, de acuerdo con Einstein¹⁵ permite afirmar que:

(...) *for an observer falling freely from the roof of a house there exists—at least in his immediate surroundings—no gravitational field* [his italics]. Indeed, if the observer drops some bodies, then these remain relative to him in a state of rest or of uniform motion, independent of their chemical or physical nature (in this consideration the air resistance is, of course, ignored). The observer therefore has the right to interpret his state as ‘at rest.’ [(...) *para un observador que cae libremente desde el tejado de una casa no existe -al menos en su entorno inmediato- ningún campo gravitatorio* [Sus cursivas]. En efecto, si el observador deja caer algunos cuerpos, éstos permanecen con respecto a él en un estado de reposo o de movimiento uniforme, independientemente de su naturaleza química o física (en esta consideración se ignora, por supuesto, la resistencia del aire). Por tanto, el observador tiene derecho a interpretar su estado como “en reposo”.] (Pais, 2005, p. 520)

Por esta razón, este principio revistió de otras apreciaciones respecto a la luz y el tiempo. En primera instancia, se configuró la mirada sobre la propagación en línea recta de la luz (Véase en: 2.2.2 Curvatura de la luz), puesto que al curvarse el espacio-tiempo puede afirmarse que hay una posible deflexión de la luz en inmediaciones a los campos gravitacionales. De igual manera, mediante un razonamiento físico derivado del efecto Doppler de la luz que consiste en la variación de la frecuencia aparente que deriva del movimiento relativo de el emisor y observador, Einstein realizó una predicción sobre la posible relación entre el tiempo y la gravedad; donde dedujo que en lugares próximos a campos gravitacionales el tiempo debe fluir más lentamente (Thorne, 1994).

La importancia de esta idea que emerge de sus famosos “*gedankenexperiment*” (Experimentos mentales), permitió a Einstein deducir además una relación estrecha entre la gravedad y la geometría del espacio-tiempo, lo cual se evidencia mediante la siguiente

¹⁵Esto fue considerado por Einstein como ‘*glücklichste Gedanke meines Lebens*’ [“El pensamiento más feliz de mi vida”]; ya que permitía modificar la teoría de gravitación de Newton por una en la cual las leyes de la relatividad especial encajarían. Véase en: Pais, A. (2005). “Subtle is the Lord” Oxford University Press. New York. Capítulo IV: Relativity, the general theory.

afirmación “(...) the gravitational field influences and even determines the metrical laws of the space-time continuum.” [(...) el campo gravitacional influye e incluso determina las leyes métricas del continuo espacio-tiempo](Einstein, 1922, p. 34). Esto indica que, tener en cuenta los campos gravitacionales implica que las propiedades geométricas en el espacio-tiempo no se cumplen los teoremas de la geometría euclidiana. Por esta razón, esta nueva teoría de gravitación requería sentar sus bases desde una geometría curva, en la cual debe reconocerse el carácter dinámico del espacio-tiempo (Einstein, 1922).

Para ello, era necesario que las ecuaciones de la teoría de la relatividad especial se hicieran extensivas a los campos gravitacionales. Esto condujo a una reformulación de la ley de gravitación de Newton, donde la gravedad no sería aquella fuerza de carácter atractivo entre los cuerpos. Ahora, desde una descripción relativista de los fenómenos gravitacionales, se concibe como resultado de la curvatura del espacio-tiempo que produce la materia-energía presentes.

En este sentido, la atracción gravitacional de los planetas del sistema solar hacia el Sol, por ejemplo, es el resultado de las trayectorias geodésicas¹⁶ que, siguen los planetas por la curvatura del espacio-tiempo que produce el Sol (Véase en: Figura 2.3). Esta nueva perspectiva de la gravitación, además, no solo permite configurar la mirada de su naturaleza. También, reestructura la concepción de las mediciones del espacio y el tiempo, en relación con el campo gravitacional.¹⁷

¹⁶De acuerdo con Wald (1984). “(...) geodesics are line that curve as little as possible”; they are the “straightest possible lines one can draw in a curved geometry.” [(...) las geodésicas son líneas que “se curvan lo menos posible”; son las “líneas más rectas posibles” que se pueden trazar en una geometría curva.] (p.41)

¹⁷En 1911, Einstein realiza algunas apreciaciones sobre un disco rígido en rotación ya que este se podía relacionar con un campo gravitatorio de acuerdo con el principio de equivalencia. Así pues, plantea dos sistemas de referencia: K (Inercial), en donde no existe ningún campo gravitatorio y otro K_0 (En rotación) en el que existe un campo gravitatorio. De acuerdo con la TER para K existe una variación en la medida del tiempo para los relojes que se encuentran en diferentes zonas del disco en rotación. De esta manera, Einstein generaliza tal hecho para todos los campos gravitacionales, además de establecer que la luz también se ve afectada por el campo gravitacional. Véase en: Einstein (1922). The meaning of relativity. United States of America: Princeton University Press. pp. (32-34).

Es importante reconocer que, esta nueva perspectiva de gravitación revolucionó de manera contundente las nociones de la geometría del espacio-tiempo y de la materia. Puesto que, la gravedad ya no sería concebida como un resultado de la fuerza de acción a distancia entre cuerpos tal como lo establecía Newton. En vez de ello, “doblaría” el espacio-tiempo, lo cual como resultado permite generar un campo gravitacional

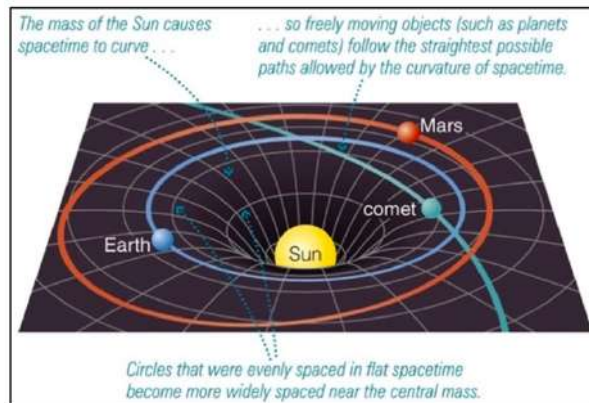


Figura 2.3: Representación de la curvatura causada por el sol y el recorrido de la Tierra y Marte. Tomada de: http://woodahl.physics.iupui.edu/Astro100/S3-13b_anno.jpg

que hace mover a los cuerpos alrededor de esta concentración de materia. De ahí que, esta nueva perspectiva permitió precisar algunos fenómenos que a través de la ley de gravitación de Newton no era posible fundamentar. Entre ellos, se encuentran, por ejemplo: La precesión del perihelio de Mercurio, la existencia de la anomalía del cometa Encke, entre otras.¹⁸

2.1.3. Ecuaciones de campo de Einstein

“El espacio-tiempo le dice a la materia cómo moverse; la materia le dice al espacio-tiempo cómo curvarse”
John A. Wheeler, 1958.

Como se mencionó anteriormente, el camino para determinar las ecuaciones que permitieron formalizar la teoría general de la relatividad, fue exhaustivo. Para Penrose (2006) el principio de equivalencia propuesto por Einstein en 1907 y que trazó su línea de pensamiento, fue determinante para el estudio realizado de las *fuerzas gravitatorias de marea*¹⁹,

¹⁸Véase en: Sánchez, J (1983). “El origen y desarrollo de la relatividad” Madrid-España: Alianza Editorial. Capítulo VIII: Las teorías de la gravitación en la generación anterior a Einstein.

¹⁹Para entender las fuerzas de marea se puede retomar el ejemplo dado por Thorne (1994): Un astronauta que es atraído por la tierra siente mayor atracción en sus pies (más cercanos a la tierra) que en su

siendo clave para la formulación de su teoría de gravitación. Para Thorne (1994) “el desafío de Einstein consistía en formular una ley gravitatoria completamente nueva que fuera compatible con el principio de relatividad y a la vez explicara la gravedad de marea de forma nueva, sencilla e inevitable” (p. 263). Lo anterior, permitió a Einstein establecer la validez del principio de equivalencia para sistemas de referencia muy pequeños, en donde las fuerzas de marea son mínimas comparadas con cuerpos de gran tamaño.²⁰

De ahí subyace la idea revolucionaria de Einstein, en la cual la gravedad toma ahora un carácter geométrico. La materia presente tiene incidencia directa con la distorsión del espacio-tiempo que, a su vez, es el responsable de la creación de un campo gravitacional. Por esta razón, fue posible considerar que estas *fuerzas de marea* que experimenta un cuerpo en inmediaciones de un campo gravitatorio, son el resultado de una manifestación de la curvatura espacio-temporal.

A partir de ello, era impensable que las ecuaciones de campo de Einstein cumplieran con el *principio de covariancia*, la cual establece que las leyes de la física deben tener el mismo efecto en todos los sistemas de referencia. Para esto, fue indispensable el estudio de las geometrías curvas que habían propuestos los matemáticos Bernhard Riemann (1826-1866), Gregorio Ricci (1853-1925) y Tullio Levi-Civita (1873-1941) a partir del análisis tensorial²¹. Los estudios respecto a las ecuaciones de campo fueron trabajadas tanto por Einstein, como por el matemático Marcel Grossmann (1878-1936) quienes alrededor del año 1913 realizaron una publicación sobre las ideas preliminares de las ecuaciones de campo²². Finalmente Einstein publicó en 1915 su artículo titulado: *“Die*

cabeza, por lo que siente una tensión entre la cabeza y los pies, así como una compresión lateral. Véase en: Thorne, K. (1994). “Agujeros negros y tiempo curvo” Capítulo II: La distorsión del espacio y del tiempo.

²⁰“(…) un sistema de referencia en caída libre suficientemente pequeño (un sistema muy pequeño comparado con la distancia sobre la que varía apreciablemente la atracción gravitatoria) uno no sería capaz de detectar ninguna influencia de la gravedad de marea; es decir, los sistemas de referencia pequeños en caída libre en nuestro Universo dotado de gravedad son equivalentes a sistemas inerciales en un universo sin gravedad. Pero no es así para sistemas grandes” (Thorne, 1994, p. 260).

²¹De acuerdo con Sánchez (2015): “Los tensores son objetos matemáticos que mantienen su forma bajo transformaciones arbitrarias de coordenadas” (p.597)

²²En 1913 Albert Einstein y Marcel Grossmann publican en la revista alemana *Zeitschrift für an-*

Feldgleichungen der Gravitation””[Las ecuaciones de campo de la gravitación]²³, donde hizo públicas las formalizaciones físico-matemáticas que redefinieron el concepto de gravedad tras un estudio riguroso de esta geometría. En este trabajo, Einstein establece dos requisitos que debían tener estas ecuaciones de campo:

I. La densidad de materia que se describe en la teoría de Newton, se replantea por la fuente de la gravedad que es el tensor energía-momento.

II. Límite newtoniano: A velocidades pequeñas comparadas con las de la luz y campos gravitacionales débiles, se debe recuperar la teoría de gravitación de Newton.

A partir de ello, determina las siguientes ecuaciones:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad (2.2)$$

En este caso el tensor de Ricci ($R_{\mu\nu}$), caracteriza la geometría de la curvatura espacio temporal, así como las trayectorias geodésicas que tienen las partículas alrededor del campo gravitacional. Mientras tanto, el tensor métrico ($g_{\mu\nu}$) describe no sólo el espacio-tiempo, también el campo gravitacional. Por otra parte, el tensor energía-momento ($T_{\mu\nu}$) simboliza el contenido de materia-energía que genera la deformación del espacio-tiempo. Es importante comentar que, estas ecuaciones de campo fueron interpretadas por el físico estadounidense John Archibald Wheeler mediante la siguiente frase: “la materia le dice al espacio cómo se debe curvar. El espacio le dice a la materia cómo se debe mover” (Sánchez, 2015, p.1015). Lo anterior, puede ser evidente al identificar la representación de los tensores ubicados a la izquierda (la parte geométrica) y a la derecha (cantidad de

gewandte Mathematik und Physik, un artículo denominado: “Entwurf Einer Verallgemeinerten Relativitätstheorie und Einer Theorie Der Gravitation””[Diseño de una teoría generalizada de la relatividad y una teoría de la gravitación.], en las cuales realizan sus primeros estudios referentes a la matemática tensorial en esa búsqueda de las ecuaciones de campo de gravitación. Allí, se hace explícita una primera parte de física y una segunda denominada parte matemática. Recuperado de: https://sites.pitt.edu/~jdnorton/teaching/GR&Grav_2007/pdf/Einstein_Entwurf_1913.pdf

²³Einstein, A (1915). “Die Feldgleichungen der Gravitation.” Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte. 844-847. Recuperado de: https://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/get_file?pdfs/SPAW./1915/1915SPAW.....844E.pdf

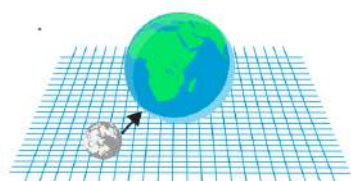
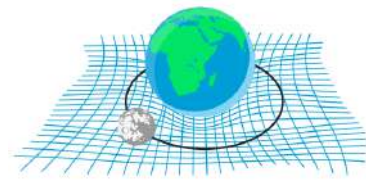
materia).

El estudio de las ecuaciones de la teoría general de la relatividad fue significativo en cuanto a las investigaciones que se desprenden de los fenómenos gravitacionales que se trabajan en el campo de la astronomía. De hecho, sus avances posibilitaron potenciar esta área del conocimiento de manera trascendental, ya que tanto la relatividad general como la mecánica cuántica – que hacen parte de la física moderna- sentaron las bases del estudio de los astros mediante la astrofísica. De igual modo, es clave destacar que las soluciones de estas ecuaciones de Einstein permitieron describir algunas propiedades de los agujeros negros.

Así mismo, al ser para Einstein la gravedad una de las interacciones fundamentales en la naturaleza, consideró la posibilidad de “(...) buscar soluciones cosmológicas a las ecuaciones del campo gravitacional, aplicables a todo el Universo” (Sánchez, 2015 ,p. 576), lo cual hizo público a través de la constante cosmológica que propuso en el año 1917 y que abriría también una nueva disciplina denominada: cosmología²⁴. A partir de lo anterior, se desarrollaron algunas soluciones globales que permitieron establecer algunos modelos acerca del origen, desarrollo y evolución del universo. Entre ellas se destacan la métrica de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker que se denomina también como el modelo estándar de la cosmología.

De acuerdo con las consideraciones anteriores, se muestra un cuadro comparativo entre la ley de gravitación universal propuesta por Newton en el siglo XVII y la teoría general de la relatividad planteada por Albert Einstein en el siglo XX (Véase en: Cuadro 2.1).

²⁴En este año Einstein publica un artículo denominado: Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie, en el cual agregó a sus ecuaciones de campo una constante cosmológica (Λ) el cual permitió establecer un universo estático. Es importante tener presente que para ese entonces la idea de un universo dinámico era poco fiable. Recuperado de: <https://web.archive.org/web/20200329142916/http://echo.mpiwg-berlin.mpg.de/ECH0docuView?url=/permanent/echo/einstein/sitzungsberichte/S250UZ0K/index.meta&pn=1>

La gravitación desde la concepción de Newton y Einstein	
Isaac Newton - Siglo XVII	Albert Einstein - Siglo XX
<p>Desde el punto de vista Newtoniano, la gravedad es concebida como una fuerza de acción a distancia e instantánea en la cual los cuerpos tienden a atraerse entre sí. Disminuye conforme aumenta su distancia e incrementa en relación con la masa de los cuerpos. De igual modo, en la perspectiva de Newton, la ley de gravitación universal es independiente del espacio y el tiempo, las cuales considera dos entidades independientes.</p> <p>To Newton, space and time were fixed and gravity was a force pulling objects together.</p>  <p>Attractive force of gravity</p>	<p>La mirada de Einstein sobre la gravedad, reside en concebir la igualdad entre la masa inercial y gravitacional, lo cual es posible apreciar mediante el principio de equivalencia. Así mismo, en transformar las entidades espaciales y temporales por una única perspectiva tetradimensional: El espacio-tiempo; que se curva en presencia de la masa y atrae las partículas de su alrededor.</p> <p>Einstein determined that space and time are like fabric and massive objects can warp space-time.</p> 

Cuadro 2.1: Cuadro comparativo de la gravitación entre Newton y Einstein. Imágenes tomadas de: <https://www.chegg.com/learn/topic/albert-einstein-general-relativity>

Al ser la teoría general de la relatividad una de las áreas del conocimiento que permitieron estudiar a profundidad los agujeros negros desde el campo de la astrofísica, se plantea como criterio teórico la visión de Einstein de la gravitación. Aunque su estudio

reviste de una complejidad física y matemática importante, se hace necesario desde sus generalidades poder abordar la temática con los estudiantes para explicar la curvatura de la luz, el colapso gravitacional, así como los mecanismos de detección que existen en la actualidad.

De acuerdo con lo descrito anteriormente, es primordial señalar que, al ser los agujeros negros regiones en las cuales los fenómenos gravitacionales resultan ser predominantes, se considera relevante determinar como criterio teórico para su caracterización y descripción (desde el punto de vista Newtoniano) el carácter atractivo de la fuerza de gravedad; reconociendo la importancia de la masa de los cuerpos que interactúan y su distancia de separación. A su vez, se establece clave la interacción de acción a distancia que expone la ley de gravitación universal, ya que posibilita visibilizar la relación que tienen estos conceptos con la formación de agujeros negros mediante el colapso de una estrella.

Así mismo, es significativo acercar a los estudiantes a la concepción de Einstein sobre la gravitación; siendo esto una apuesta por aproximarlos al estudio de la astrofísica que se considera un campo de investigación de la física moderna. De ahí que, se concibe relevante el establecimiento de esta teoría de gravitación como uno de los criterios epistemológicos y teóricos puesto que, posibilita a los aprendices reconocer la noción de gravedad bajo estas dos perspectivas, en especial de la relatividad general, que resuena frecuentemente en el aula al momento de hablar de agujeros negros.

2.2. La luz

Los agujeros negros suelen conocerse por ser regiones en el espacio que pueden absorber todo aquello que se encuentre a su alrededor e incluso la luz. Sin embargo, es este mismo fenómeno de radiación que permite dar cuenta de su existencia, tiene un significado especial al ser su velocidad un límite para cualquier señal. Por esta razón, se realiza a continuación una descripción de los estudios sobre la naturaleza de la luz y la curvatura que se produce en inmediaciones de campos gravitacionales de acuerdo con la teoría general de la relatividad.

2.2.1. Estudios sobre la naturaleza de la luz: ¿Onda y/o partícula?

“Difícilmente podemos evitar la inferencia de que la luz consiste de ondulaciones transversales del mismo medio que es la causa de los fenómenos eléctricos y magnéticos”

James Clerk Maxwell, 1861.

La luz ha sido uno de los fenómenos físicos más conocidos desde nuestros antepasados. Los cambios del día y la noche o las estrellas parpadeando en el cielo nocturno han sido sólo algunas de las experiencias sensibles que han acercado al ser humano al estudio de su propia esencia. Particularmente, en el siglo XVII surgieron las primeras teorías respecto a su naturaleza las cuales se enmarcaron principalmente en dos miradas: La corpuscular y la ondulatoria. Dentro de la primera perspectiva, sobresale el papel de Isaac Newton²⁵, quien por un lado consideró que la luz estaba compuesta por minúsculos corpúsculos; mientras que Christian Huygens²⁶ por su parte, interpretó la luz como una onda que se propagaba en un medio que fue denominado el éter luminífero²⁷. Aunque en ese momento no se había definido con total certeza su naturaleza, se hicieron algunos intentos por

²⁵En 1704 se publica el libro de Newton llamado “Opticks or a treatise of the reflexions, refractions, inflexions and colours of light” [Óptica: Tratado de los reflejos, refracciones, inflexiones y colores de la luz] en el cual discute sobre los fenómenos de la luz en la cual incluye la explicación sobre la descomposición de la luz blanca, además de la reflexión y refracción de ella bajo la perspectiva corpuscular. Recuperado de: <https://library.si.edu/digital-library/book/optickstreatise00newta>

²⁶En el año 1690 tras descubrir el trabajo realizado sobre el modelo corpuscular de la luz de Newton, Huygens publica un libro denominado “Traité de la lumière” (Tratado sobre la luz) en el cual explica las causas sobre los fenómenos de reflexión y refracción de la luz desde la perspectiva de la luz como una onda. Recuperado de: <https://library.si.edu/digital-library/book/traiteydelalumi00huyg>

²⁷Despite its value, Huygens’ wave model, described in full detail in 1690 in his Treatise on Light, was ignored by most scientists for more than a century. If they had adopted the corpuscular model, it was because of the tremendous prestige conferred upon Newton, who had managed to explain the motions of planets through his law of universal gravitation.”[A pesar de su valor, el modelo ondulatorio de Huygens descrito a detalle en 1690 en su Tratado sobre la luz, fue ignorado por la mayoría de los científicos durante más de un siglo. Si ellos adoptaron el modelo corpuscular, fue por el gran prestigio conferido a Newton, quien había logrado explicar el movimiento de los planetas a través de su ley de gravitación universal.] Véase en: Aspect, A. (2017). “From Huygen’s waves to Einstein’s photons: Weird light”. Comptes Rendus Physique. Vol. 18 (498-503). Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2017.11.005>

medir su velocidad.

El primero esfuerzo para determinar el valor de la velocidad de la luz, fue expuesto por Galileo Galilei en su obra de 1638 (*Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*), en la que planteaba que esta no podía moverse con rapidez infinita, contrario a lo que se creía en su época. Este experimento controlado se realizó a través de la medición en el tiempo de respuesta de la percepción de la luz de dos linternas ubicadas en dos extremos.



Figura 2.4: Ilustración del experimento de Galileo Galilei. Tomada de: <https://museovirtual.csic.es/salas/luz/luz2.htm>

De acuerdo con Cassini (2015), esta experiencia se describe de la siguiente manera: “(...) Dos hombres provistos de una lámpara cada uno se coloca a una corta distancia e intercambian señales tapan-do y destapando las lámparas de mane-ra sincronizada (...) Dividiendo dos ve-ces la distancia que los separaba por el tiempo transcurrido desde que el prime-ro destapaba su lámpara hasta que recibía la luz del otro, se obtenía la velocidad de la luz” (pp. 47-48) (Véase en: Figura 2.4).

Este experimento realizado por Galileo, permitió afirmar que el valor de la velocidad de la luz debía ser bastante alto. Por ello, era necesario reconocer que la distancia de separación debía ser suficiente para que los intervalos de tiempo pudiesen medirse con precisión, puesto que eran muy pequeños. Sin embargo, aunque no fue posible determinar una cifra exacta, esta experiencia se destaca en la historia por ser uno de los primeros intentos por medir la velocidad de la luz (Cassini, 2015, p.47).

Otra prueba que se realizó para determinar que la velocidad de propagación de la luz no era infinita provino en 1676 por el astrónomo danés Ole Roemer, quien lo consiguió por primera vez al observar una de las lunas de Júpiter descubiertas por Galileo, Io. Esta

experiencia se realizó mediante la observación de los eclipses de este satélite (Véase en: Figura 2.5) en la cual “comprobó que su luz, al entrar o salir de la sombra del planeta, tardaba menos tiempo en llegar a la Tierra cuando este se encontraba cerca de Júpiter que cuando se hallaba más alejado” (Cardona, 2012, pp.174-175). En este caso, Roemer descubrió que Io tenía un tiempo de revolución alrededor de Júpiter de 42,5 horas. De manera que, la luna debía salir o entrar del eclipse detrás de este planeta en ese lapso de tiempo.

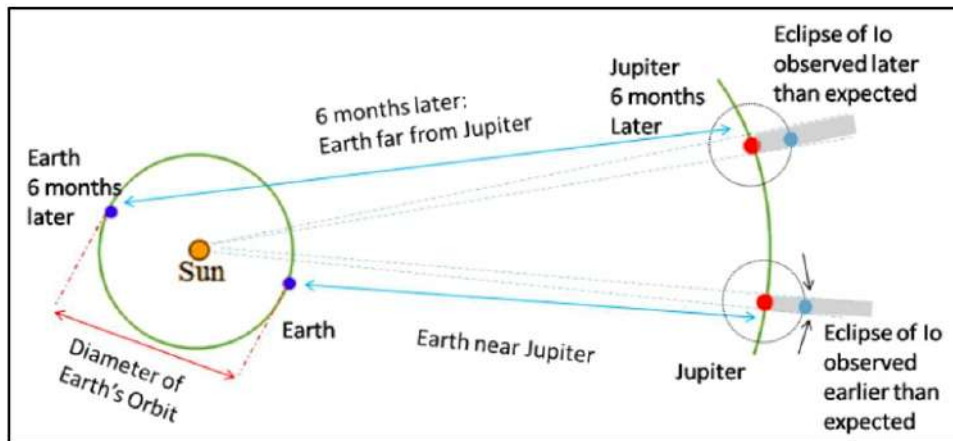


Figura 2.5: Ilustración del experimento de Roemer Tomada de: Choudhury, B. (2016). From infinite to finite - Measurements on speed of light: A historical review.

Así pues, cuando la Tierra está cerca de Júpiter (Earth near Jupiter) la luz tarda menos tiempo en viajar que cuando se encuentra lejos seis meses después (Earth 6 months later), estas diferencias fueron de aproximadamente 22 minutos. Por ende, al conocer la distancia entre estos dos planetas y el intervalo de tiempos fue posible calcular la velocidad de la luz que fue de 138000 millas por hora (222089 kilómetros por hora). No obstante, “(...) eclipse time lag is not 22 minutes, but 16 minutes and 36 seconds. With these corrections, the same calculation yields the speed as 186.000miles per second” [(...) el desfase del eclipse no es de 22 minutos, sino de 16 minutos y 36 segundos. Con estas correcciones, el mismo cálculo arroja una velocidad de 186.000 millas por segundo.] (Choudhury, 2016).

Posteriormente, el cálculo de la velocidad de la luz fue realizado por James Bradley a

partir del descubrimiento del fenómeno de la aberración estelar²⁸. Según afirma Sánchez (2015) este ocurre por “(...) la diferencia entre la posición observada de una estrella y su posición real, diferencia debida a la combinación de la velocidad del observador y la velocidad de la luz.” (p. 52). Con ello, Bradley a través de una serie de cálculos y basándose en la teoría corpuscular de la luz dedujo que la luz se propagaba a 298.500 kilómetros por segundo. Si bien existieron otras experiencias para el cálculo de la velocidad de la luz de la mano del físico francés Armand Fizeau en 1849²⁹ y Leon Foucault en 1850³⁰, fue en 1879 que Albert Michelson estableció su valor más aproximado mediante sus experimentos ópticos, afirmando tal como lo indica al finalizar su artículo que este valor es de 299.828 kilómetros por segundo.³¹

Otro de los modelos más importantes referentes a la naturaleza de la luz es la que hace James Clerk Maxwell, a partir de los trabajos realizados por Michael Faraday sobre los fenómenos electromagnéticos. Esencialmente, afirma Sánchez (2015) “Faraday creó el concepto campo electromagnético, con el que expresaba que los efectos de la electricidad y el magnetismo producidos por cargas o imanes penetraban en el espacio.” (pp.45-46). Sin embargo, fue Maxwell quien construyó una teoría completa sobre el campo electromagnético mediante la unificación de la electricidad y el magnetismo.³²

²⁸Las apreciaciones sobre el fenómeno de aberración estelar las publicó en su artículo de 1728 denominado “IV A letter from the Reverend Mr. James Bradley Savilian Professor of Astronomy at Oxford, and F. R. S. to Dr. Edmond Halley Astronom. Reg. c. giving an account of a new discovered motion of the fix'd stars” publicado por la Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Recuperado de:<https://royalsocietypublishing.org/doi/epdf/10.1098/rstl.1727.0064>

²⁹Véase en: Fizeau, A. (1849). “Sur une expérience relative à la vitesse de propagation de la lumière” Comptes Rendus de la Académie des Sciences 29, pp. 90-92 et 132 Recuperado de: https://www.academie-sciences.fr/pdf/dossiers/Fizeau/Fizeau_pdf/CR1849_p90.pdf

³⁰Véase en: Foucault, L. (1850) “Méthode générale pour mesurer la vitesse de la lumière dans l'air et les milieux transparents: Vitesses relatives de la lumière dans l'air et dans l'eau: Projet d'expérience sur la vitesse de propagation du calorique rayonnant”. Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences 30 S. 551-560.

³¹Véase en: Michelson, A. (1879). “Experimental determination of the velocity of light”. Nature 21, 120-122. Recuperado de: <https://rdcu.be/cLpUK>

³²Las ideas sobre la teoría del campo electromagnético se plasmaron inicialmente en un primer artículo en 1865 denominado “A dynamical theory of the electromagnetic field” (Véase en: <https://library.si.edu/digital-library/book/dynamicaltheoryo00maxw>) y más tarde en 1873 en su obra

Una de las ideas más significativas propuestas por Maxwell la realizó en sus primeros trabajos sobre el campo electromagnético. Específicamente en 1861 en su artículo “On physical lines of force” [Sobre las líneas físicas de la fuerza] Maxwell afirmaba que la luz podía entenderse como un campo electromagnético: “Difícilmente podemos evitar la inferencia de que la luz consiste de ondulaciones transversales del mismo medio que es la causa de los fenómenos eléctricos y magnéticos” (Maxwell, 1861, como se citó en Sánchez, 2009). De ahí que, para estudiar el comportamiento de los campos electromagnéticos, Maxwell retomó la idea del éter el cual se constituía en el espacio y sería el medio en el cual ocurrían este tipo de fenómenos; es decir el medio por el cual se transportaría la luz. Por lo anterior, los fenómenos eléctricos, magnéticos y ópticos eran ahora estudiados mediante una sola teoría, la electromagnética.³³

Más adelante, con la llegada de la física moderna, la concepción sobre la naturaleza de la luz tomó un nuevo rumbo. Los avances de la mecánica cuántica permitieron dilucidar una nueva perspectiva, la cual consideraba la dualidad onda-partícula. Estos hallazgos fueron posibles gracias a los estudios realizados por el físico francés Louis De Broglie³⁴ (1892-1987) quien a través de los trabajos elaborados por Max Planck (radiación del cuerpo negro) y Albert Einstein (efecto fotoeléctrico) estableció su hipótesis sobre el comportamiento ondulatorio de la materia, específicamente de los electrones. No obstante, De Broglie (1929) afirma que “(. . .) to describe the properties of matter as well as those of light, waves and corpuscles have to be referred to at one and the same time” [(. . .) para describir las propiedades de la materia, así como las de la luz, hay que referirse a la vez “Treatise on Electricity and Magnetism” siendo esta última una de las obras más importantes en la historia de la física análoga a los principios de Newton. (Véase en: <https://archive.org/details/electricandmagne01maxwrich/page/n11/mode/2up>)

³³Si bien la obra realizada por Maxwell se considera como uno de los pilares fundamentales dentro de la física, existían algunos problemas frente al movimiento de las cargas eléctricas en campos electromagnéticos que fueron resueltos con la llegada de la teoría especial de la relatividad de Einstein en 1905.

³⁴La Real Academia Sueca de las ciencias, condecoró a De Broglie con el nobel de física de 1929 por sus trabajos referentes a su hipótesis sobre el comportamiento ondulatorio de la materia: “for his discovery of the wave nature of electrons”: <https://www.nobelprize.org/uploads/2016/04/broglie-lecture.pdf>

de las ondas y los corpúsculos] (p.256), considerando así el comportamiento dual de la luz.

Bajo esta perspectiva es importante mencionar que, la física moderna no solo revolucionó la mirada sobre la naturaleza de la luz, también sus propiedades. Especialmente, las ideas preliminares de la teoría general de la relatividad permitieron a Einstein vislumbrar la posibilidad de la desviación de la luz bajo los campos gravitacionales. De ahí que, emerge la importancia de identificar estas características que se derivan del principio de equivalencia y que facilita al físico alemán realizar estas afirmaciones respecto a la probabilidad de la curvatura de la luz en inmediaciones a concentraciones de materia-energía en el universo.

2.2.2. Curvatura de la luz por la gravedad

“La luz tiene energía, y la energía es equivalente a la masa; en consecuencia, la luz también cae”

Richard Feynman, 1965.

Las implicaciones que surgieron del principio de equivalencia propuesto por Einstein en 1907, hizo posible determinar la incidencia que tiene el campo gravitacional en la trayectoria recorrida por la luz y las variaciones del tiempo que se producen en diferentes puntos. Para iniciar, es clave recordar que una de las propiedades de la luz es que viaja en línea recta, en todas las direcciones y con una velocidad constante de acuerdo con la relatividad especial. Sin embargo, afirma Hartle (2014) “if we accept the equivalence principle, we must also accept that light falls in a gravitational field with the same acceleration as material bodies.” (p. 113) [Si aceptamos el principio de equivalencia, debemos aceptar también que la luz cae en un campo gravitatorio con la misma aceleración que los cuerpos materiales].

Lo anterior, puede explicarse mediante la situación expuesta en la figura 2.6, donde se muestran dos marcos inerciales (inertial frame) y dos marcos no inerciales (rocket frame and gravitational field). Allí, puede verse que para los observadores que se encuentran en el marco de referencia inercial, la trayectoria de la luz es rectilínea. No obstante, puede verse que los puntos de entrada y salida de la luz son diferentes. Especialmente el extremo de

salida que se encuentra más bajo implica que, al estar la nave (rocket frame) acelerando la luz “cae” con esta misma aceleración. Por ende, según Hartle (2014) mediante el principio de equivalencia es posible deducir que este mismo comportamiento que ocurre en la nave puede ocurrir en un campo gravitacional (gravitational field) (p.113); de ahí que, fue posible inferir que “gravity attracts light” (Hartle, 2014, p. 114).

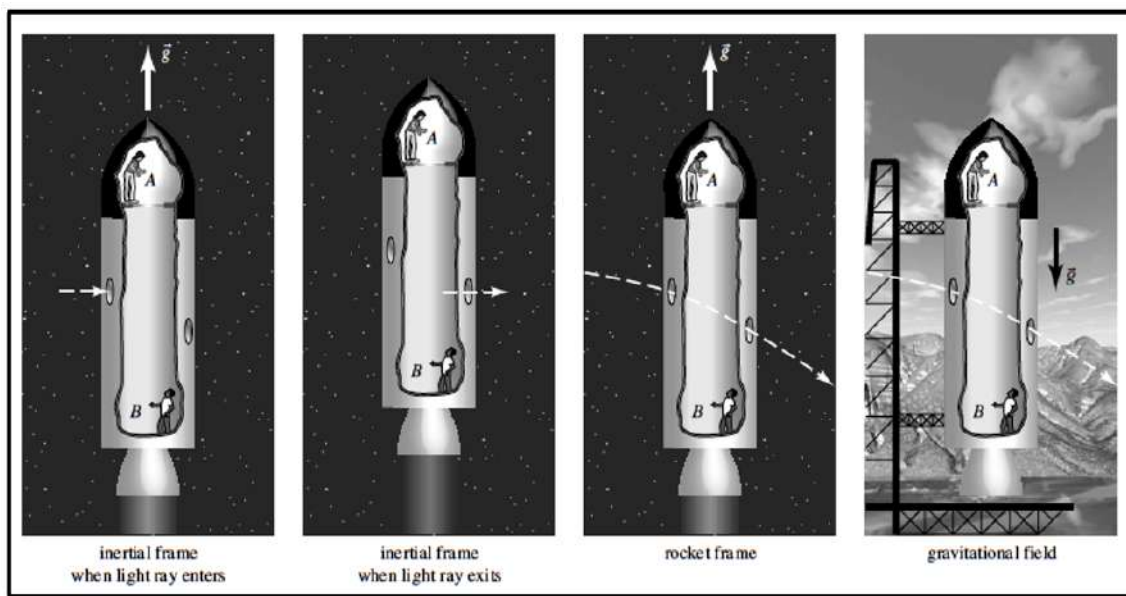


Figura 2.6: Ilustración sobre las direcciones que toma un rayo de luz bajo marcos inerciales y marcos no inerciales. Tomado de: Hartle, J. (2014). “Gravity: An introduction to Einstein’s General Relativity”. First Edition. United States of America: Pearson Education Limited.

No obstante, considerando los principios de la teoría de la relatividad especial, es posible afirmar que la luz en realidad no acelera ni desacelera al ser su velocidad constante. En realidad, siguiendo los principios de la relatividad general, los rayos de luz deben seguir la trayectoria más recta posible, que son las geodésicas (Véase en: Figura 2.7). Por ende, cerca de campos gravitacionales la luz termina por curvarse, de manera que los rayos lumínicos emitidos por una estrella se doblarán cerca de un campo gravitacional, generando así que las posiciones de las estrellas que se ven desde la Tierra sean algunas aparentes (Benett, Donahue, et al. 2020).

En este punto es importante mencionar que, el estudio realizado sobre la deflexión de la luz por los campos gravitacionales lo llevó a cabo Einstein en 1907 a través de su artículo denominado: “Über den Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des lich-

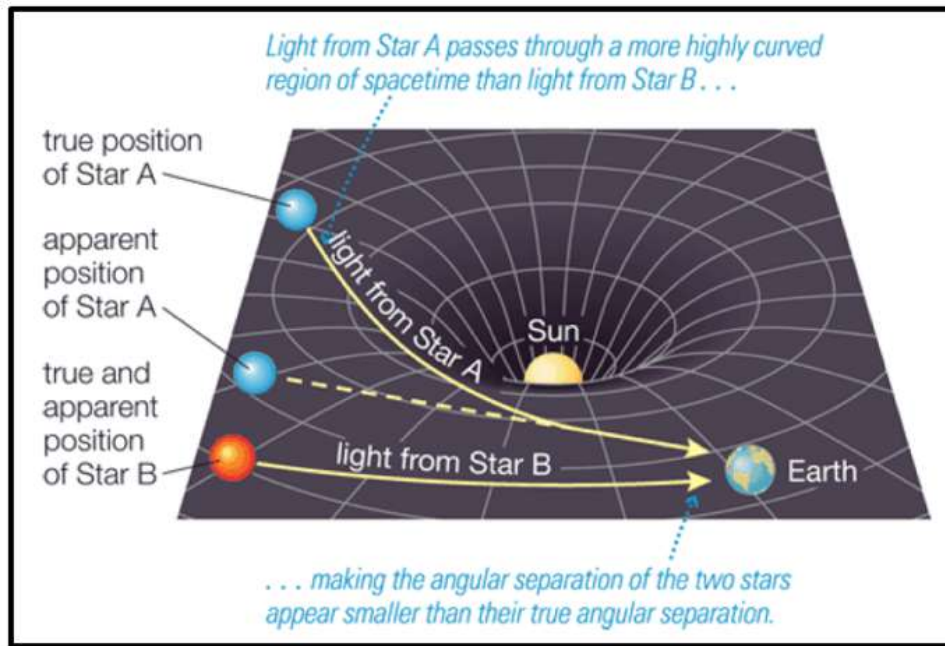


Figura 2.7: Representación de las trayectorias de la luz y las posiciones aparente de una estrella A (Star A) y una estrella B (Star B) alejada de la curvatura producida por la luz. Tomado de: Bennett, J. Donahue, M. Schneider, N. y Voit, M. (2020). “The cosmic perspective” (p. 1574) tes” [Sobre la influencia de la gravedad en la propagación de la luz]³⁵. En este trabajo, el físico alemán comenta la posibilidad de comprobar experimentalmente la influencia del campo gravitacional en la desviación de los rayos luminosos que pasan cerca al Sol.³⁶

La afirmación que realizó Einstein, se basó en considerar la separación angular (Arco) que existe entre una estrella y su posición aparente. A partir de esto, tal como menciona el mismo Einstein “(...) a light-ray going past the Sun would accordingly undergo deflection by the amount of $4 \times 10^6 = 0,83$ seconds of arc” [(...) un rayo de luz que pasara

³⁵Einstein, A (1907). “Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des lichte.” *Annalen der Physik* 35, pp. (898-908). Recuperado de: <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol3-doc/524>

³⁶La idea inicial sobre la influencia de los campos gravitacionales en la luz, deriva desde las ideas de Newton y su visión corpuscular. En su libro de óptica, formula la pregunta: “Do not Bodies act upon Light at a distance, and by their action bend its Rays; and is not this action strongest at the least distance?” [¿No actúan los cuerpos sobre la luz a distancia, y por su acción doblan sus rayos; y no es esta acción más fuerte a la menos distancia?] “Pais, A. (2005). *Subtle is the Lord*” Oxford University Press. New York; p. (344)”

junto al Sol sufriría una desviación de $4 \times 10^6 = 0,83$ segundos de arco]³⁷. Lo determinante de esta afirmación, fue plantear la posibilidad de comprobar experimentalmente tal efecto mediante un eclipse total de Sol; que sería además una primera comprobación de la teoría general de la relatividad. Sin embargo, es importante aclarar que tras la versión final de las ecuaciones de campo de la relatividad general en 1916, Einstein comprobó que las trayectorias geodésicas del Sol causaban una desviación adicional, de modo que tal predicción fue corregida a 1,75 segundos de arco cerca al Sol.

La comprobación experimental de este fenómeno, estuvo a cargo del astrónomo inglés y director del observatorio real de Greenwich Frank Watson Dyson, el astrofísico Arthur Stanley Eddington en 1919³⁸; quien buscó confirmar la predicción hecha por Albert Einstein³⁹. Para ello, se propuso realizar la expedición a Brasil, específicamente a Sobral y a la Isla Príncipe ubicada en África occidental, para tomar las fotografías con mayor claridad. No obstante, la decisión de ir a estos dos lugares fueron consecuencia de los cálculos realizados respecto a la proyección de la sombra de la luna y los consejos recibidos por parte del director del observatorio de Río de Janeiro Henry Morize; quien afirmaba que Sobral sería un lugar predilecto para la observación del eclipse (Kennefick, 2019).

³⁷Traducción del alemán al inglés del artículo “On the influence of Gravitation on the propagation of light” realizada por Michael D. Godfrey de la Universidad de Stanford. Tomado de: http://www.relativitycalculator.com/pdfs/On_the_influence_of_Gravitation_on_the_Propagation_of_Light_English.pdf

³⁸Es importante mencionar que tras la publicación del artículo de Einstein, se realizaron diversos intentos para comprobar este fenómeno. Algunas de ellas fueron realizadas en el Observatorio Nacional de Argentina en Córdoba por parte del astrónomo norteamericano Charles Dillon Perrine. Otras expediciones se realizaron en Argentina, Alemania y la Unión Soviética. No obstante, tras la declaración de la guerra por parte de Alemania en la primera guerra mundial, en la excursión hacia la Unión Soviética los astrónomos alemanes fueron obligados a retornar a su país. Sin embargo, los astrónomos que quedaron a cargo no pudieron realizar las fotografías debido a las condiciones climáticas que se presentaron.

³⁹Frank Dyson, como muchos astrónomos, era escéptico con la relatividad general. Y en ese momento, los alemanes eran percibidos como el enemigo. Dyson, movido por un sentimiento patriótico, creía que la teoría de Isaac Newton debía ser tratada con más respeto que la de un joven de Alemania.^afirma Tom Kerss del observatorio de Greenwich a la BBC. Por su parte Eddington, creyente de la teoría de Einstein convenció a Dyson de realizar esta expedición. Información tomada de: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-48153620>

Para fotografiar este eclipse, se realizaron algunos arreglos en los instrumentos y se establecieron dos grupos. En el primero se encontraba el astrofísico Artur Eddington y el relojero Edwin Cottingham quienes viajaron a la isla de Príncipe; el segundo equipo estuvo conformado por el calculista Charles Davidson y el astrónomo Andrew Crommelin⁴⁰ El propósito central de esta excursión, tal como lo afirman en su artículo: “*A determination of the deflection of light by the Sun’s gravitational field, from observations made at the total eclipse of May 29, 1919*”⁴¹, era determinar qué efecto produce en la trayectoria un campo gravitatorio cuando un rayo de luz lo atraviesa. Así mismo, tal como afirman Dyson, F, Eddington, F, Davidson, C. (1919), se buscaba descartar las siguientes posibilidades:

- Que las trayectorias de la luz no fueran influenciadas por la gravedad.
- Que la energía o “masa” de la luz esté sujeta a la gravitación de la misma forma que la materia ordinaria, de modo que la desviación sería alrededor de 0,85 segundos de arco tal como afirma la teoría de gravitación newtoniana.
- Que el curso de los rayos de luz estén acordes a las predicciones de la relatividad general, lo cual conduciría a un desplazamiento aparente de una estrella de 1,75 segundos de arco.

Reconocer las posiciones aparentes que podrían tener las estrellas por la deflexión de la luz, hizo posible que ambos científicos establecieran un método para poder confirmar o descartar este fenómeno. Por ende, el método utilizado consistió en exponer imágenes del campo estelar durante el eclipse, luego tomar en la noche imágenes del mismo y compararlos (Véase en: Figura 2.8). Las placas o fotografías de comparación debían tomarse en una época diferente del año, para que el Sol pudiera salirse de este campo estelar y para que estuvieran en la misma posición del cielo (Kennefick, 2009, p.39).

⁴⁰De acuerdo con Kennefick (2019) ambos equipos viajaron en el buque inglés Anselm, que fue además la primera embarcación en salir al atlántico luego del desenlace de la primera guerra mundial. Véase en: Kennefick (2019). No shadow of a doubt the 1919 eclipse that confirmed Einstein’s theory of relativity. Princeton University Press. New Jersey (pp. 173-174).

⁴¹Dyson, F, Eddington, F, Davidson, C. (1919). A determination of the deflection of light by the Sun’s gravitational field, from observations made at the total eclipse of May 29, 1919. Philosophical transactions of the Royal Society. Series A, containing papers of a mathematical and physical character, 220 (pp. 291-333). Tomado de: <https://w.astro.berkeley.edu/~kalas/labs/documents/dyson1920.pdf>

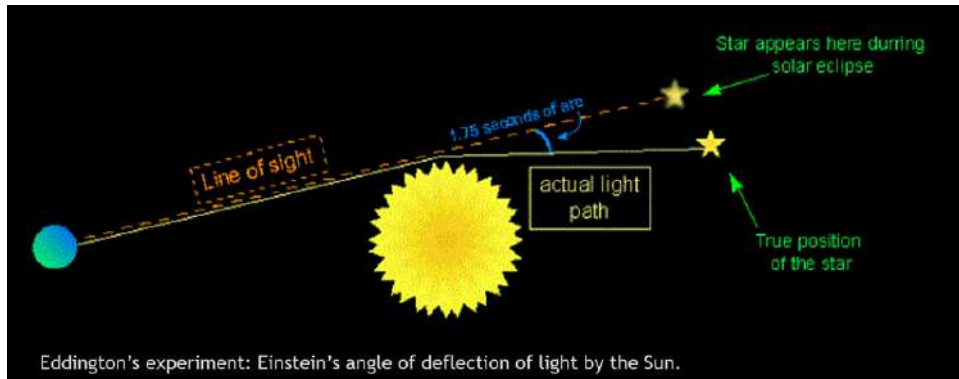


Figura 2.8: Ilustración del experimento de Eddington para determinar la deflexión de la luz causada por el sol. Tomado de: <https://sciencemeetsfaith.wordpress.com/2018/05/29/arthur-s-eddington-and-the-bending-of-light/>

Este fenómeno ocurrido en 1919, tal como sostiene Kennefick, 2009 “ (...) was recognized as a particularly favorable opportunity because of the presence of unusually bright stars belonging to the Hyades cluster close to the Sun during the eclipse” (p. 38) [fue reconocido como un fenómeno particularmente favorable debido a la presencia inusual de las estrellas brillantes pertenecientes al cúmulo de Híades cerca del Sol durante el eclipse].

Este cúmulo estelar (Véase en: Figura 2.9) que hizo presencia durante el eclipse de 1919, se caracteriza por tener a una de las estrellas más brillantes: Aldebarán, que se encuentra ubicada en la constelación de tauro. La importancia de este cúmulo de estrellas, deriva de las imágenes que se pudieron adquirir durante el eclipse. Su brillo permitió que no las opacara la corona solar.



Figura 2.9: Fotografía del cúmulo de Híades por el astrónomo Jose Mtanous. Tomado de: <https://apod.nasa.gov/apod/ap200122.html>

Las fotografías captadas por el equipo de Sobral fueron un poco más nítidas que aquellas tomadas por el grupo de Eddington debido a las condiciones atmosféricas.

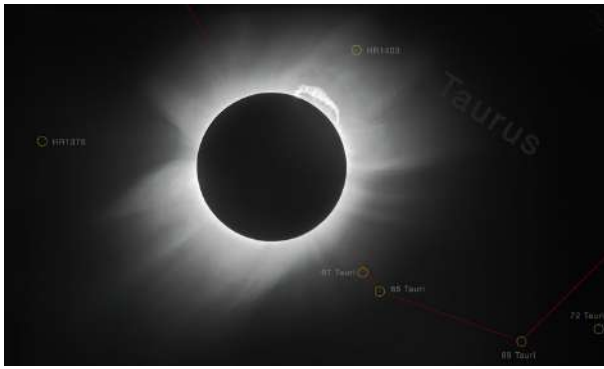


Figura 2.10: Fotografía con mayor resolución del eclipse de 1919. Tomado de: <https://www.eso.org/public/spain/images/potw1926a/>
man que:

(...) Thus, the results of the expeditions to Sobral and Principe can leave little doubt that a deflection of light takes place in the neighbourhood of the sun and that it is of the amount demanded by EINSTEIN'S generalised theory of relativity, as attributable to the sun's gravitational field. But the observation is of such interest that it will probably be considered desirable to repeat it at future eclipses. The unusually favourable conditions of the 1919 eclipse will not recur, and it will be necessary to photograph fainter stars, and these will probably be at a greater distance from the sun. [Así pues, los resultados de las expediciones a Sobral y Príncipe no dejan lugar a dudas de que se produce una desviación de la luz en las proximidades del Sol y que es de la magnitud exigida por la teoría generalizada de la relatividad de Einstein, como atribuible al campo gravitatorio del Sol. Pero la observación es de tal interés que probablemente se considerará conveniente repetirla en futuros eclipses. Las condiciones excepcionalmente favorables del eclipse de 1919 no volverán a repetirse, y será necesario fotografiar estrellas más débiles y éstas estarán probablemente a mayor distancia del Sol.] (p.333)

La comprobación que se realizó a través del eclipse de 1919 junto con la divulgación de sus resultados el 6 de Noviembre de 1919, trajo consigo mucho más que la confirmación

de la predicción de la deflexión de la luz hecha por Einstein en 1911. Lo anterior, fue una confirmación de la misma teoría de la general de la relatividad, lo cual convirtió a Albert Einstein como uno de los científicos más importantes de la historia. Más aún por ser una revolución en cuanto a la concepción de la gravedad newtoniana que no había sido modificada en más de 200 años.⁴²

Con base en lo anteriormente descrito, estas consideraciones relacionadas con la naturaleza y la curvatura de la luz, se establecen como criterios epistemológicos y teóricos para la descripción de las características estructurales de los agujeros negros. Especialmente, son relevantes para dar cuenta de la luz que no puede salir del agujero negro, que se pregunta recurrentemente en el aula al hablar de este tipo de fenómenos astrofísicos. Así mismo, permite identificar la propagación de la luz precisamente en lo que respecta a la trayectoria de la luz desde una mirada clásica, que se configura en la relatividad general con la deflexión de la luz en un campo gravitacional. Lo anterior, posibilita tener claridad en la explicación de los elementos tecnológicos e incluso teóricos que se requieren para la detección de agujeros negros a través de los radiotelescopios y lentes gravitacionales.

⁴²Tras el resultado del artículo enunciado por la Unión Astronómica Internacional, el día 15 de Noviembre de 1919 se publica en la portada del New York Times un artículo denominado: “Lights all askew in the heavens. Einstein theory triumphs”, lo cual convierte a Einstein a su vez en una celebridad. Información tomada de: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-48153620>

Capítulo 3

Un viaje hacia los agujeros negros

En este capítulo, se realizan algunas apreciaciones de carácter histórico, epistemológico y teórico de los agujeros negros. Así pues, se destacan las ideas preliminares que surgieron de estos cuerpos por los científicos Michell y Laplace, quienes, a partir de la teoría de gravitación universal de Newton, establecieron una idea preliminar de tales fenómenos astrofísicos bajo el nombre de estrellas oscuras. De igual manera, se expone la primera visión moderna de ellos mediante la solución de las ecuaciones de campo de Einstein por parte del físico alemán Karl Schwarzschild, quien las denomina singularidades de Schwarzschild. Luego, se recalcan diversos componentes clave de su astrofísica con la descripción de su origen a través de la evolución estelar, su clasificación y estructura. Finalmente, se presentan algunos de los estudios contemporáneos sobre su búsqueda, entre las que se encuentran las fotografías de agujeros negros, las lentes y ondas gravitacionales, las cuales se han desarrollado gracias a los avances teóricos y tecnológicos de los últimos años.

3.1. Agujeros negros

Aunque los agujeros negros se reconocen como cuerpos astrofísicos que se investigaron con mayor profundidad durante el siglo XX, el bagaje histórico sobre su origen, toma un significado relevante ya que los primeros indicios de su existencia se realizaron en el siglo XVII mediante la ley de gravitación universal de Newton. Por esta razón, en la siguiente sección se realiza una descripción de las ideas propuestas por Michell y Laplace bajo el

nombre de estrellas oscuras. Finalmente, se expone el panorama moderno de estas regiones tras las ecuaciones de campo de Einstein a partir de la solución de Schwarzschild.

3.1.1. Las estrellas oscuras de Michell y Laplace

“(...) es posible que los mayores cuerpos luminosos del Universo sean invisibles”

P. Simon Laplace, 1796.

En la actualidad, los agujeros negros han sido uno de los fenómenos astrofísicos más llamativos en el campo científico¹. Aunque las propiedades de estos objetos astronómicos se desarrollaron con mayor profundidad durante el siglo pasado gracias al desarrollo de la Teoría General de la Relatividad, las primeras ideas sobre su posible existencia se establecieron a finales del siglo XVIII por parte de John Michell bajo el nombre de “estrellas oscuras”. De acuerdo con Israel (1977), “Michell’s work is of course based on two of Newton’s major hypotheses, universal gravitation and the corpuscular theory of light” [El trabajo de Michell se basa por supuesto en las dos hipótesis de Newton, la gravitación universal y la teoría corpuscular de la luz] (p.202). Lo anterior deriva de la importancia que tuvo los principios matemáticos de la filosofía natural de Isaac Newton en 1687, ya que muchos astrónomos intentaron utilizarlas a favor de la explicación de fenómenos que ocurrían en el universo.

La posibilidad de hablar de estrellas oscuras, parte de las observaciones que realizaron algunos astrónomos durante el siglo XVIII a sistemas particulares de estrellas dobles conocidos como sistemas binarios. En esta época, la investigación orientada hacia la astronomía estelar no era tan recurrente, pues la mayoría de científicos estaban centrados en estudiar el movimiento de planetas, el Sol y la Luna. Sin embargo, Michell apreció la potencialidad que tenía la ley de gravitación universal de Newton en el estudio de la astronomía, por lo cual a través de sus estudios fue posible plantear unas relaciones que podían determinar algunas propiedades como su brillo, masa, circunferencia, entre otras².

¹Como se verá más adelante, especialmente durante la segunda década del siglo XXI los hallazgos realizados han sido protagonistas en los premios nobel de física de los últimos años

²Véase en: Michell, J. (1784) On the means discovering the distance, magnitude, of the fixed stars,

Adicionalmente, considerar la luz como una partícula permitió determinar la posibilidad de que éstas fueran atraídas también por la gravedad y en consecuencia disminuyera su velocidad (Bartusiak, 2016).

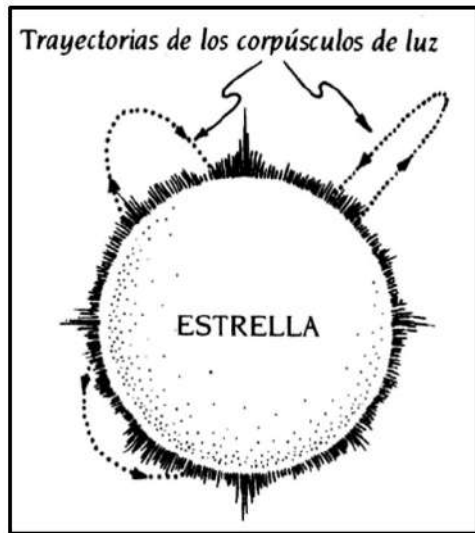


Figura 3.1: Comportamiento de la luz emitida por una estrella. Tomada de: Thorne, K. “Agujeros negros y tiempo curvo: El escandaloso legado de Einstein”

En ese sentido, Michell plantea una idea trascendente tras pensar que “cuanto más grande fuera la estrella, mayor sería la resistencia gravitacional sobre la luz y por tanto disminuiría su velocidad.” (Bartusiak, 2016, p. 45); lo cual haría que la estrella no emitiera ningún tipo de radiación, es decir que permaneciera oscura, siendo este resultado la primera aproximación al agujero negro (Véase en: Figura 3.1).

Lo anterior, puede describirse en palabras de Michell (1784) de la siguiente manera:

(...) if the semi-diameter of a sphere of the same density with the sun were to exceed that of the sun in the proportion of 500 to 1, a body falling from an infinite height towards it, would have acquired at its surface a greater velocity than that of light, and consequently, supposing light to be attracted by the same force in proportion to its force inertial, with other bodies, all light emitted from such a body would be made to return towards it, by its own proper gravity. [(...) Si el semidiámetro de una esfera de la misma densidad que el sol excediera al de éste en la proporción de 500 a 1, un cuerpo que

in consequence of the diminution of the velocity of their light in case such a diminution should be found to take place in any of them, and such other data should be procured from observations, as would be farther necessary for that purpose. Philosophical transactions of the Royal Society of London. Vol. 74 pp. (35-57).

cayera desde una altura infinita hacia él, habría adquirido en su superficie una velocidad mayor que la de la luz, y por consiguiente, suponiendo que la luz fuera atraída por la misma fuerza en proporción a su fuerza inercial, con otros cuerpos, toda la luz emitida por tal cuerpo estaría de vuelta hacia él por su propia gravedad](p. 42)

La afirmación realizada por Michell, posibilitó pensar en la existencia de estrellas mucho más grandes que el sol. En ellas, era posible considerar que la velocidad de escape podría ser comparada e incluso superada por la de la luz al tratarse de cuerpos celestes con una gravedad mayor (Israel, 1977). Así pues, para entender esta velocidad de escape, es indispensable considerar que:

(...) si un proyectil se lanza hacia arriba con una velocidad suficientemente grande, continuará su movimiento ascendente indefinidamente, pues la gravedad decreciente es demasiado débil para frenarlo y devolverlo a la superficie. Es en este sentido en el que un proyectil puede escapar de la gravedad de la Tierra. (Susskind, 2009, pp.50-51)

Con ello, tanto Michell como Laplace (como se verá más adelante) consideraron que para las estrellas que son suficientemente masivas, la luz sería atraída con tal fuerza que era posible considerarlas oscuras e incluso invisibles. De manera que, la velocidad de la luz terminaría siendo igual a la velocidad de escape.

La velocidad de escape está determinada a partir de la siguiente expresión, que relaciona la masa del cuerpo (M), el radio (R) y la constante de gravitación universal (G):

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \quad (3.1)$$

Así pues, si un proyectil “(...) parte con una velocidad algo menor que la velocidad de escape, caerá de nuevo a la Tierra. Si parte con una velocidad mayor, el proyectil escapará al infinito” (Susskind, 2009, p.51). Por ende, en el caso que se tome esta velocidad de escape igual a la velocidad de la luz, el tamaño al que debería contraerse el cuerpo

debe ser lo suficiente considerable para que la luz de su superficie no pueda ser emitida.

Por otro lado, el matemático Pierre Simon Laplace realizó algunas apreciaciones entorno a los “cuerpos ocultos” en 1796. En su trabajo *Exposition du système du monde*[Exposición sobre el sistema del mundo]³, realizó algunas aproximaciones a propósito de los hallazgos expuestos por Michell, en este indica que:

Un astre lumineux de meme densité que la terre, et dont le diamètre seroit deux cent cinquante fois plus grand que celui du soleil, ne laisseroit en vertu de son attraction, parvenir aucun de ses rayons jusqu'à nous; il est done possible que les plus grands corps lumineux de l'univers, soient par cela meme, invisibles. [Una estrella luminosa de la misma densidad de la tierra y cuyo diámetro sería doscientas cincuenta veces mayor que el sol, no permitiría por su atracción que ninguno de sus rayos nos alcanzara; es posibles, pues, que los mayores cuerpos luminosos del universo sean por ello invisibles](p.548)

Con esta afirmación, Laplace además de asumir la disminución del radio de un cuerpo estelar también consideró como un punto importante el incremento de la densidad de este, lo cual daba algunos indicios de lo que en el siglo XX se denominaría el colapso gravitacional. No obstante, afirma Israel (1977)

Speculation about invisible stars went quickly out of favour as the wave theory of light gained ascendancy especially after the discovery of interference by Thomas Young in 1801 and removed any reason to believe that light should be affect by gravity.⁴ [Las especulaciones sobre las estrellas invisibles cayeron rápidamente conforme la teoría ondulatoria de la luz fue ganando adeptos, especialmente tras el descubrimiento de la interferencia por parte de Thomas Young en 1801 y eliminó cualquier razón para creer que la luz se viera afectada por la gravedad] (p. 204)

De ahí que, la idea sobre este cuerpo celeste propuesto por Michell y Laplace no continuó siendo estudiada, ya que, la teoría ondulatoria empezó a tener un auge signifi-

³Véase en: Laplace, PS. (1796) *Exposition du Système du monde* Vol. 1 y 2. Paris, Francia.

⁴Con respecto a esto, las hipótesis sobre las estrellas invisibles de Laplace fueron eliminadas en sus posteriores ediciones de: *Exposition du système du monde*.

cativo durante esa época. Hablar sobre estrellas oscuras en las cuales los corpúsculos de luz eran atraídos por la gravedad ya no era posible puesto que, al asumirla como una onda no tendría que verse afectada por ningún campo gravitacional. No obstante, los planteamientos propuestos durante el siglo XX sobre la gravedad y la luz, permitieron retomar el estudio de las estrellas oscuras bajo el nombre (en principio) de singularidades de Schwarzschild.

3.1.2. Renacer de las estrellas oscuras: Solución de Schwarzschild

*“As you see, the war treated me kindly enough,
in spite of the heavy gunfire,
to allow me to get away from it all and
take this walk in the land of your ideas.”*

Karl Schwarzschild, 1915

Poco después de publicar el artículo *“Die Feldgleichungen der Gravitation”* (1915) que establecía las ecuaciones de campo que configurarían la perspectiva de la gravitación newtoniana, Einstein se embarcó en trabajar la aplicación de su teoría general de la relatividad para la explicación del avance del perihelio de Mercurio ⁵. Fue con ello, que el físico y astrónomo alemán Karl Schwarzschild⁶ (1873-1916) desarrolló la primera solución

⁵Einstein, A. (1915). “Erklärung der Perihelbewegung des Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie.” *Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften* (Berlin), Seite pp. (831-839). Recuperado de: <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1915SPAW.....831E>

⁶“The first exact solution of Einstein’s field equation was born in hospital. Unfortunately, the circumstances were more tragic than joyful. The astronomer Karl Schwarzschild joined the German army right at the beginning of World War I and served in Belgium, France, and Russia. At the end of the year 1915, he was admitted to hospital with an acute skin disease. There, not far from the Russian front, enduring the distant gunfire, he found time to “stroll through the land of ideas” of Einstein’s theory, as he puts it in a letter to Einstein dated 22 December 1915.” [La primera solución exacta de las ecuaciones de Einstein nació en el hospital. Desafortunadamente, las circunstancias fueron más trágicas que alegres. El astrónomo Karl Schwarzschild se alistó en el ejército alemán junto al comiendo de la primera guerra mundial y sirvió en Bélgica, Francia y Rusia. A finales de 1915, ingresó al hospital con una enfermedad aguda de la piel. Allí, no lejos del frente ruso, soportando los lejanos disparos, encontró tiempo para “pasear por el país de las ideas” de la teoría de Einstein, como él mismo afirma en la carta enviada a

exacta que se divulgó en el documento publicado el 13 de Enero de 1916 con el nombre de “Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie” [Sobre el campo gravitatorio de una masa puntual según la teoría de Einstein.]⁷. Allí, expone algunas condiciones que cree fundamentales reformular respecto al último trabajo de Einstein, especialmente, en lo que refiere al tipo de coordenadas utilizadas; para dar con el resultado que le permitiera representar el campo gravitacional de una masa esférica y estática⁸.

Las consideraciones que establece Schwarzschild, hacen alusión a una serie de condiciones que cree pertinentes a la hora de llegar a la ecuación exacta para describir las trayectorias de las partículas alrededor de un campo gravitacional producido por una concentración de materia estática. Los criterios que planteó el físico alemán en el artículo publicado en Enero de 1916 fueron los siguientes:

1. Todas las componentes del elemento de línea son independientes del tiempo.
2. La solución es espacialmente simétrica con respecto al origen de coordenadas, lo cual la haría invariante bajo transformaciones.
3. Cuando r tiende al infinito, la solución toma la forma del espacio-tiempo minkowskiano (Schwarzschild, 1916)

A partir de ello, junto con el análisis matemático realizado por Schwarzschild en este artículo, se establece como resultado la siguiente ecuación:

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2m}{r}\right) dt^2 - \left(1 - \frac{2m}{r}\right)^{-1} dr^2 - r^2(d\theta^2 - \sin^2\theta d\varphi^2) \quad (3.2)$$

Einstein el 22 de diciembre de 1915.] Véase en: Ni, Wei-Tou. (2017). One hundred years of General Relativity. From genesis and empirical foundations to gravitational waves, cosmology, and quantum gravity. Vol. 1. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore.

⁷Schwarzschild, K. (1916) Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie. Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften. pp. (189-196). Recuperado de: <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1916SPAW.....189S>

⁸Es importante mencionar que, las coordenadas que utilizó Einstein en su trabajo sobre el avance del perihelio de Mercurio fueron rectangulares; mientras Schwarzschild en su artículo establece las polares para llegar al elemento de línea que le permitiría establecer la primera solución exacta de las ecuaciones de campo.

Es importante tener en cuenta que la simetría esférica que utiliza esta solución, corresponde a la descripción de un campo gravitatorio que genera una masa esférica. Por ello r se considera la coordenada de orden radial, mientras θ y ϕ a las variaciones en “latitud y longitud” de la esfera. Esta solución se denominada métrica de Schwarzschild y se reconoce como una de las más importantes dentro del campo de la relatividad general, ya que su aplicación va mucho más allá del sistema solar (Ohanian, H y Ruffini, R. 2013). Tal como afirma Wald (1984), su relevancia radica en que,

(...) predicts tiny departures from Newtonian theory for the motion of planets in our solar system, and, in addition, predicts the “bending of light”, the gravitational redshift of light, and “time delay” effects.” [(...) predice pequeñas desviaciones de la teoría newtoniana para el movimiento de los planetas de nuestro sistema solar, y, además, predice la “curvatura de la luz”, el corrimiento gravitatorio al rojo de la luz y los efectos del “retardo temporal”⁹] (Wald, R. 1984, p.118)

No obstante, el resultado que obtuvo el físico alemán traía consigo una característica notable cuando r tomaba los valores de 0 y $2m$, ya que parecían existir singularidades. En estas regiones, “the gravitational fields (...) are so strong that nothing can escape from their grip. Light signals, particles, and even spacecraft with the most powerful engines are inexorably pulled inward.” [los campos gravitacionales (...) son tan fuertes que nada puede escapar de sus garras. Las señales luminosas, las partículas e incluso las naves espaciales con los motores más potentes son atraídas inexorablemente hacia el interior.] (Ohanian, H y Ruffini, R. 2013, p.324). De ahí que, la existencia de este punto de “no-retorno”, fue conocido como *el radio de Schwarzschild* y reavivó el estudio de las estrellas

⁹“In general relativity, this time independence of the spherically symmetric solution is important in the study of gravitational collapse, when a mass is crushed by its own weight and shrinks to a smaller and smaller size. In the exterior region, the gravitational field of such a collapsing mass remains unchanged, but in the interior region, the gravitational field changes with time. [En relatividad general, esta independencia temporal de la solución esféricamente simétrica es importante en el estudio del colapso gravitacional, cuando una masa es aplastada por su propio peso y se reduce a un tamaño cada vez menor. En la región exterior, el campo gravitatorio de dicha masa que colapsa permanece invariable, pero en la región interior, el campo gravitatorio cambia con el tiempo.] Véase en: Ohanian, H y Ruffini, R. (2013). Gravitation and Spacetime. 3rd edition. Cambridge University Press. Unites States of America. Chapter 7: Einstein’s gravitational theory: Schwarzschild solution and Birkhoff theorem.

oscuras de Michell y Laplace, ya que sentó las bases del estudio de los agujeros negros.

En este sentido, es clave comentar que la idea de cuerpos que eran capaces de atraer los corpúsculos de luz, fue establecida a partir del concepto de velocidad de escape (Véase en: Ecuación 3.1). No obstante, si ésta coincide con la velocidad de la luz ($v_e = c$), se puede obtener un radio crítico; es decir, un límite estacionario o de no retorno en la cual la materia se comprime de tal manera que la luz no puede escapar¹⁰. Este punto, está determinado por el radio de Schwarzschild, que se determina mediante la siguiente expresión matemática:

$$R = \frac{2GM}{c^2} \quad (3.3)$$

Esta ecuación permite determinar el radio mínimo que requiere una estrella (por ejemplo), para que la luz quede totalmente confinada. Por ende, este resultado obtenido por Schwarzschild, es similar al propuesto por Michell y Laplace en el siglo XVII. En efecto afirma Thorne (1994):

(...) una estrella con el tamaño de la circunferencia crítica debe aparecer completamente oscura cuando se la mira desde muy lejos; debe ser lo que ahora llamamos un agujero negro. El resultado final es el mismo, pero el mecanismo es completamente diferente. (p. 238)

La diferencia del mecanismo que menciona Thorne anteriormente, radica en la perspectiva clásica de los agujeros negros que se realizó con la mirada newtoniana de la gravedad y que se configura radicalmente en el siglo XX con el concepto de Einstein de la gravitación establecida en la teoría general de la relatividad. Por esta razón, se considera relevante realizar un comparativo sobre ambos planteamientos el cual se evidencia a continuación:

¹⁰“La cuestión del círculo mágico fue objeto de discusiones apasionadas en el Coloquio de París de 1922. Alrededor de Einstein se reunió el más bello «ramillete de relativistas» que imaginarse pueda, entre ellos, Jean Becquerel, Henri Brillouin, Elie Cartan, Jacques Hadamard y Paul Langevin. Sin embargo, este ejército de físicos teóricos no fue capaz de resolver el problema matemático planteado por el radio crítico. A lo sumo, presintieron la eventualidad del colapso gravitatorio.” Véase en: Luminet, J. (1991). “Agujeros negros”. Madrid – España, Alianza Editorial. Capítulo 9: El horizonte químico.

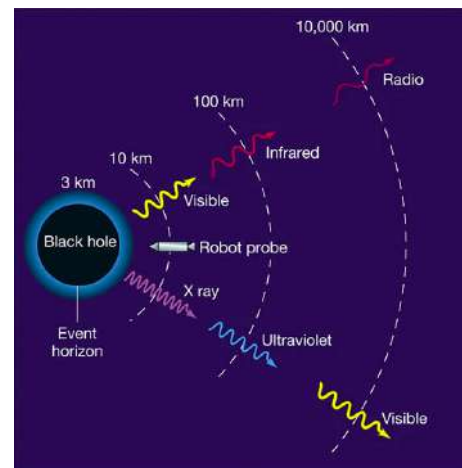
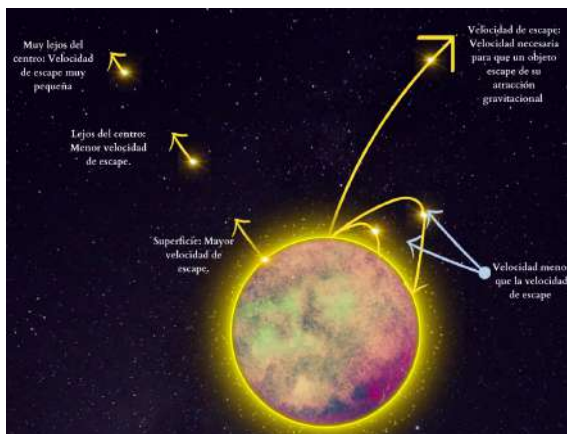
Los agujeros negros bajo la ley de gravitación y la relatividad general

Estrellas oscuras de Michell y Laplace -
Siglo XVII

Singularidad de Schwarzschild - Siglo XX

Para una estrella más pequeña que su circunferencia crítica, los corpúsculos de luz no escaparían del todo; por el contrario, subirían a gran altura de la superficie de las estrellas, pero serían frenados por la gravedad de la misma estrella. De manera que, se detendrían en algún punto del espacio, darían la vuelta y serían atraídos nuevamente hacia la estrella. Si existieran algunos observadores en un planeta en órbita, la luz emitida por la estrella podría verse moviéndose lentamente. Sin embargo, para puntos lejanos a ella, no la podrían ver en absoluto. Por ende, la estrella sería oscura (Thorne, 1994).

De acuerdo con la relatividad general, la curvatura del espacio-tiempo de Schwarzschild establece que, la luz se propaga siempre de manera constante y nunca podría ser frenada. Por ende, si se emite alguna señal luminosa desde la circunferencia crítica o radio de Schwarzschild, la longitud de onda queda desplazada infinitamente, ya que el flujo del tiempo se dilata en proximidades al campo gravitacional (se ralentiza). Este desplazamiento infinito de la longitud de onda, haría que la luz dejara de existir, y con ello, la estrella quedaría invisible. Los observadores no podrían ver ninguna luz proveniente de la estrella. (Thorne, 1994).



Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

Cuadro 3.1: Los agujeros negros desde la perspectiva de la ley de gravitación y la relatividad general.

Por otro lado, es preciso mencionar que “(...) the stationary limit coincides in this spherically symmetric case with the so-called event horizon.” [(...) el límite estacionario coincide en este caso esféricamente simétrico, con el llamado horizonte de sucesos] (Heinicke, C y Hehl, F. 2017, p. I- 128), que hace alusión a una “frontera” en la cual ningún tipo de señal puede emitirse al exterior (Véase en: Figura 3.2). El horizonte de sucesos, denominado

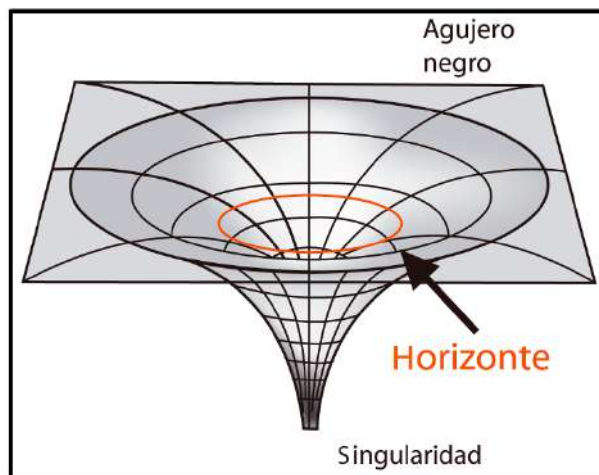


Figura 3.2: Ilustración 2D de un agujero negro, con su horizonte de eventos. Tomada de: <https://reader.digitalbooks.pro/content/preview/books/55547/book/OEBPS/capitulo-1.html>

en algunos casos horizonte de eventos, precisa de gran relevancia al ser un punto de referencia clave para explicar la dilatación gravitatoria del tiempo y el desplazamiento hacia el rojo que se acentúa aún más a partir del colapso gravitatorio de una estrella¹¹.

Es fundamental resaltar que, los resultados en torno a esta métrica, establecieron la posibilidad de un nuevo fenómeno astrofísico, los agujeros negros, que en principio fueron denominados como singularidades de Schwarzschild¹². Adicionalmente, proporcionó nuevas herramientas que ampliaron el estudio de los fenómenos astronómicos, desafian-

¹¹El desplazamiento o corrimiento al rojo hace referencia a la variación de la frecuencia y longitud de onda de la luz percibida por un observador conforme se aleja (Véase en: Sección 3.2.2)

¹²La creencia de estas regiones singularidades fue entendida en principio como una solución matemática, no física. Los principales científicos que en ese momento se especializaban en la relatividad general no concebían la posibilidad de la existencia de agujeros negros, incluso el mismo Albert Einstein, quien afirmaba “(...) “the Schwarzschild singularities” do not exist in physical reality... The “Schwarzschild singularity” does not appear for the reason that matter cannot be concentrated arbitrarily.” [(...) las singularidades de Schwarzschild no existen en la realidad física... La singularidad de Schwarzschild no aparece por la razón de que la materia no puede concentrarse arbitrariamente] Véase en: Hawking, S y Israel, W. (1987) Three Hundred Years of Gravitation. United Kingdom: Cambridge University Press. Chapter: Dark stars: the evolution of an idea.

do los conceptos que parecían estar definidos, en particular, la masa y la energía¹³. Los estudios posteriores dados a través de los trabajos de Finkelstein-Eddington¹⁴ y Kruskal-Szekeres¹⁵, implantaron una serie de coordenadas que extendían y cubrían todas las regiones de la solución de Schwarzschild. No obstante, la investigación que se abrió alrededor de la física de agujeros negros, trajo consigo un análisis novedoso de las singularidades espaciotemporales por parte de Stephen Hawking y Roger Penrose, lo cual se abordará las siguientes secciones.

3.2. Astrofísica de agujeros negros

Las investigaciones alrededor de las propiedades de los agujeros negros se ampliaron significativamente a mediados del siglo XX en la denominada edad de oro. Con la llegada de la mecánica cuántica que se trabajó paralelamente junto con la relatividad general, fue posible llegar a establecer los posibles mecanismos de formación, además de las características que tenían estas regiones espacio-temporales. Teniendo en cuenta lo anterior, en la siguiente sección, se abordan los fundamentos desde la perspectiva astrofísica de estos cuerpos partiendo de la evolución estelar, donde se mencionan algunos trabajos rea-

¹³Es importante comentar que, la existencia de cuerpos con densidades relacionadas con miles de veces la masa del sol cuestionaba a los científicos en ese momento. Sin embargo, “paralelamente, la entonces reciente teoría de la Mecánica Cuántica acredita la tesis del colapso gravitatorio prediciendo la existencia de estados «degenerados» de la materia, de una densidad que nadie hubiera osado imaginar hasta entonces.” Véase en: Luminet, J. (1991). “Agujeros negros”. Madrid – España, Alianza Editorial. Capítulo 9: El horizonte quimérico.

¹⁴La extensión que propusieron permitieron cubrir simultáneamente las regiones dentro y fuera del radio de Schwarzschild. El trabajo, se realizó individualmente primero por Eddington (1924) (Eddington, A. (1924) A comparison of Whitehead’s formulae. *Nature*. Vol. (113) p. (192)) y replanteado por Finkelstein (1958) (Finkelstein, D. (1958) Past-Future Asymmetry of the Gravitational Field of a Point Particle. *Physical Review*. Vol. (110) pp. (965-967))

¹⁵Las coordenadas de Kruskal-Szekeres, fueron propuestas de manera independiente en 1960 (Kruskal, M. (1960) Maximal Extension of Schwarzschild Metric. *Physical Review*. Vol. (119) pp. (1743-1745) y Szekeres, G. (1960) On the singularities of a Riemannian Manifold. *Publicationes Mathematicae Debrecen* Vol. (285)), a partir de los trabajos realizados sobre la métrica de Schwarzschild por parte de Einstein-Rosen (1935) “The partible problem in the General Theory of Relativity” *Phys. Rev.* 48 (73-77)”, Misner, Wheeler (1957) “Classical Physics as Geometry. *Annalen der Physik*. 2 (525-603)”

lizados al respecto; así como las condiciones de equilibrio. Posteriormente, se realiza una descripción de su evolución a través del análisis del proceso de colapso gravitacional de estrellas. Finalmente, se da a conocer la estructura y clasificación de los agujeros negros que se establecen a partir de otras soluciones de campo de Einstein, así como aquellas que se plantean de acuerdo con su masa y origen.

3.2.1. Evolución estelar

*“The nitrogen in our DNA, the calcium in our teeth,
the iron in our blood, the carbon in our apple pies
were made in the interiors of collapsing stars.*

We are made of star stuff.”

Carl Sagan, 1980.

A lo largo de la historia, la contemplación del cielo nocturno ha cautivado a la gran mayoría de los seres humanos, especialmente por la presencia de las estrellas. En la antigüedad, la observación posibilitó detectar ciertas pautas en su movimiento las cuales permitieron a nuestros antepasados reconocer que, aquello que sucedía allí no era aleatorio; por el contrario, respondía a mecanismos con una conducta que podía ser predecible (Ferré, 2017). Con el desarrollo de las ciencias y la tecnología durante los siguientes siglos, fue posible responder a no sólo a estas inquietudes; también, proporcionó diversos elementos que contribuyeron significativamente a profundizar el estudio de estos astros, particularmente en lo que refiere a su naturaleza.

Si bien el avance de la astronomía tiene sus referentes gracias a la invención del telescopio por parte de Galileo Galilei, al establecimiento de las leyes de Kepler y a la propuesta de Nicolás Copérnico del modelo heliocéntrico¹⁶; es clave comentar que, “(...) The development and confirmation of the theory of the structure and evolution of stars

¹⁶Es relevante mencionar que la astronomía fue un recurso práctico-cultural de gran importancia en las antiguas civilizaciones. Sin embargo, el desarrollo de este campo de estudio tomó trascendencia mediante los eventos mencionados anteriormente. Así mismo, se requiere resaltar el trabajo realizado por Isaac Newton en cuanto al auge de la mecánica celeste, puesto que con ello fue posible explicar el movimiento de los cuerpos en el sistema solar.

represent one of the great achievements of 20th century science.” [El Desarrollo y la confirmación de la teoría de la estructura y evolución de las estrellas representan uno de los grandes logros de la ciencia del siglo XX] (National Academy of Science, 2001, p. 63). Lo anterior, a partir de los avances teóricos de la física que fueron evidentes con la creación de la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad.

El desarrollo de la mecánica cuántica, fue imprescindible para el avance de los métodos de observación estelar. Especialmente, el trabajo realizado por Max Planck¹⁷ a principios del siglo XX surtió una serie de herramientas fundamentales para la categorización de las estrellas, particularmente en lo que refiere a la radiación térmica¹⁸. Sin embargo, a finales del siglo XIX, en el Harvard College Observatory bajo la dirección de Edward Pickering (1846-1919), diversas astrónomas entre las que se encuentran Williamina Fleming, Antonia Maury, Annie Jump Cannon, contribuyeron en la elaboración un catálogo estelar a partir de la clasificación espectroscópica de algunas estrellas que fue denominado “The Draper catalogue of Stellar Spectra” [El catálogo de Draper de espectros estelares] y que fue publicado en el año 1890¹⁹.

¹⁷Los trabajos desarrollados mediante la radiación de cuerpo negro, permitieron determinar nuevas características de la luz las cuales Planck define en la siguiente afirmación: “The term “heat radiation,” then, will be applied to all physical phenomena of the same nature as light rays. Every light ray is simultaneously a heat ray. We shall also, for the sake of brevity, occasionally speak of the color of a heat ray in order to denote its wavelength or period.” [El término “radiación térmica” se aplicará pues, a todos los fenómenos físicos de la misma naturaleza que los rayos luminosos. Todo rayo luminoso es al mismo tiempo un rayo de calor. También, en aras de la brevedad, ocasionalmente hablaremos del “color” de un rayo de calor para denotar su longitud de onda o periodo.] (Planck, M. 1914, p. 02) Véase en: Planck, M. 1904. The theory of heat radiation. (M. Masius, Trad.). Philadelphia, P. Blakiston’s Son Co. Recuperado de: <https://archive.org/details/theoryofheatradi00planrich/page/n5/mode/2up?q=heat&view=theater>

¹⁸“Spectroscopy was essential too. Using the knowledge of laboratory absorption and emission spectra of flames (late 19th century) as well as of atomic physics (early 20th century), explaining many a spectral line from atoms as well as from ions, one could start to investigate the chemical composition of stars” [La espectroscopía también era esencial. Utilizando los conocimientos de laboratorio sobre los espectros de absorción y emisión de las llamas (a finales del siglo XIX, así como los de la física atómica (a principios del siglo XX), que explicaban varias líneas espectrales procedentes tanto de átomos como de iones, se podía empezar a investigar la composición química de las estrellas.)] Véase en: De Boer y W. Seggewiss, K. S. (2008). Stars and stellar evolution. EDP sciences. Section 1.1: Historical background.

¹⁹The Astronomical Observatory of Harvard College. Pickering, E. Director. (1890). The Draper ca-

Bajo estas consideraciones, es necesario retomar los trabajos elaborados por los astrónomos Ejnar Hertzsprung²⁰ en el año 1911 y Henry Norris Russell²¹ en 1914, quienes mediante la clasificación espectral estelar, mostraron a través de un diagrama la relación entre luminosidades y temperaturas. La cual, se considera un elemento importante en la astronomía “(...) because they reveal key relationships among the properties of stars” [porque revela relaciones clave entre las propiedades de las estrellas] (Bennett, J; et al; 2020, p. 1801), lo que proporciona además una representación significativa para entender la evolución de las estrellas, tal como se puede evidenciar en la descripción que se realiza (Véase en: Cuadro 3.2).

Este diagrama cuenta con dos ejes, horizontal y vertical, cada uno de ellos describe una característica de las estrellas:

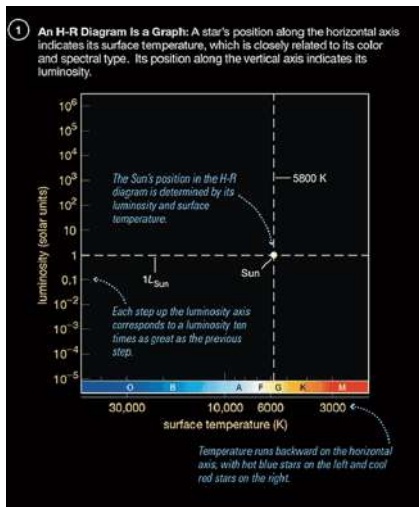
- Eje horizontal: Representa las temperaturas de la superficie de las estrellas, las cuales se pueden clasificar de acuerdo con su tipo espectral, que se designan con las letras OBAFGKM. En este caso, “(...) O stars are the hottest and bluest, while M stars are the coolest and reddest” [las estrellas O son las más calientes y azules, mientras que las M son las más frías y rojas] (Bennett, J; et al; 2018, p. 322).
- Eje vertical: Da cuenta de la luminosidad y el radio estelar. Allí, “Luminosity class I stars have the largest radius, with radius decreasing to luminosity class V” [Las estrellas de clase de luminosidad I tienen los radios más grandes, mientras que los radios disminuyen hasta la clase de luminosidad V] (Bennett, J; et al; 2018, p. 322)

talogue of Stellar Spectra. Cambridge John Wilson and Son. Recuperado de: <https://archive.org/details/drapercatalogueo00harvrich/page/n7/mode/2up>

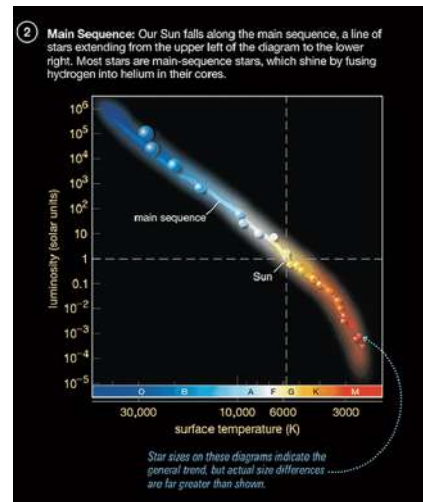
²⁰Hertzsprung, E. (1911). Über die Verwendung Photographischer Effektiver Wellenlaengen zur Bestimmung von Farbaequivalenten. Publikationen des Astrophysikalischen Observatoriums zu Potsdam

²¹Russell, H. N. (1914). Relations Between the Spectra and Other Characteristics of the Stars. Popular Astronomy, 22, 275–294. Recuperado de: <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1914PA....22..275R>

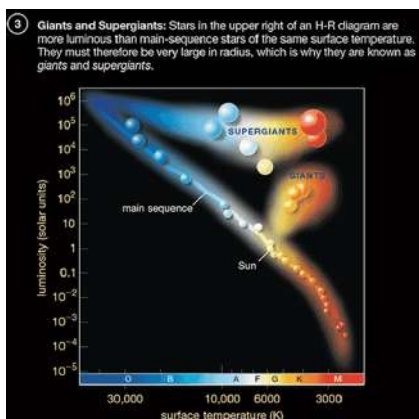
Explicación de las secciones que componen el diagrama de Hertzsprung-Russell.



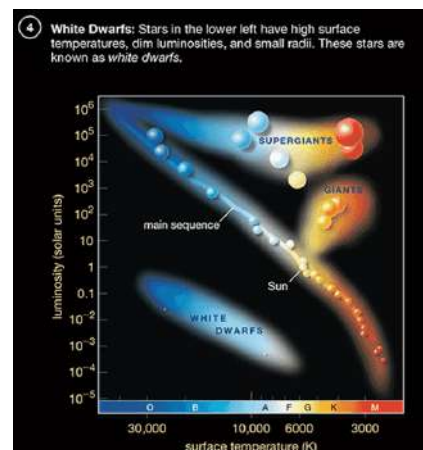
1. La posición de una estrella en el eje horizontal indica su temperatura superficial, que está relacionada con su color y tipo espectral. Su posición en el eje vertical indica su luminosidad.



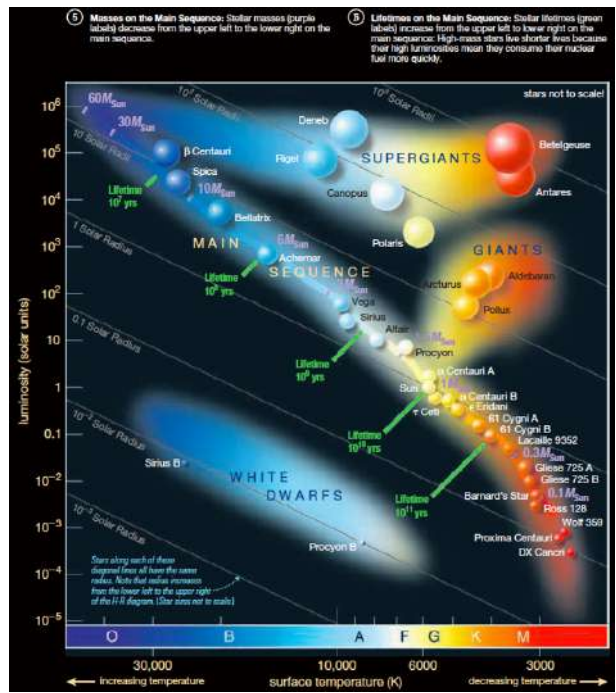
2. Nuestro Sol se encuentra en la secuencia principal, una línea de estrellas que se extiende desde la parte superior izquierda del diagrama hasta la parte inferior derecha. La mayoría de las estrellas de la secuencia principal brillan por la fusión del hidrógeno y helio en su núcleo.



3. Las estrellas situadas en la parte superior derecha del diagrama H-R son más luminosas que las estrellas de la secuencia principal con la misma temperatura superficial, por tanto su radio debe ser muy grande.



4. Las estrellas de la parte inferior izquierda tienen altas temperaturas superficiales, luminosidades débiles y radios pequeños. Estas estrellas se conocen como enanas blancas.



5. Las masas estelares (etiquetas moradas) disminuyen de la parte superior izquierda a la inferior derecha de la secuencia principal.
6. Las vidas estelares (etiquetas verdes) aumentan desde la parte superior izquierda a la inferior derecha de la secuencia principal: Las estrellas de gran masa tienen vidas más cortas porque debido a su alta luminosidad, consumen su combustible nuclear más rápidamente.

Imágenes y descripciones tomados de: Bennett, J. et al (2020). "The cosmic perspective" (p. 1801)

Cuadro 3.2: Explicación de las secciones que componen el diagrama de Hertzsprung-Russell.

Si bien el trabajo realizado por ambos astrónomos permitió establecer algunos parámetros característicos de ciertas estrellas, fue el astrónomo, físico y matemático Arthur Stanley Eddington (1882 - 1944) quien aportó de manera significativa al campo de la astrofísica estelar por sus trabajos realizados sobre las propiedades físicas que tienen las estrellas durante su evolución, tales como su estructura y la fuente de energía en su interior (Cardona, P. 2016).

En el año 1920 en el artículo denominado "The internal constitution of the stars" [La

constitución interna de las estrellas]²² Eddington proporcionó una idea del mecanismo de fusión nuclear en las estrellas, proponiendo la posibilidad de un efecto mecánico directo en el cual “(. . .) force of radiation-pressure, as it is called, makes an important difference in the formulation of the conditions for equilibrium of a star.” [La fuerza de presión de radiación, como se denomina, marca una diferencia importante en la formulación de las condiciones de equilibrio de una estrella] (Eddington, 1920, p. 15)²³. Estas investigaciones derivaron de años anteriores, el trabajo propuesto por Karl Schwarzschild en 1906 sobre las características para el equilibrio hidrostático de la atmósfera solar fue determinante para extenderla a las demás estrellas²⁴.

De este modo, se destaca la segunda década del siglo XX, ya que los avances alrededor del estudio de las características de las estrellas fue determinante gracias al desarrollo de la mecánica cuántica. En especial, la obra cúlpe de Eddington “The internal Constitution of Stars” (1926)²⁵ permitió a otros físicos como Subrahmanyan Chandrasekhar a realizar una descripción más precisa sobre el mecanismo que utilizarían a las enanas blancas a no colapsar²⁶. Lo anterior, a partir del modelo de estructura estelar que propuso Eddington

²²Eddington, A. (1920) The Internal Constitution of the Stars. *Nature* 106, 14–20 (1920). Recuperado de: <https://doi.org/10.1038/106014a0>

²³Eddington, A. On the Radiative Equilibrium of the Stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 77, Issue 1, November 1916, Pages 16–35. Recuperado de: <https://doi.org/10.1093/mnras/77.1.16>

²⁴Schwarzschild, k. (1906). Ueber das Gleichgewicht der Sonnenatmosphäre. *Nachrichten von der Königlischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. Math. -phys. Klasse*, 195, p. 41-53. Recuperado de: https://www.digizeitschriften.de/download/pdf/252457811_1906/log9.pdf

²⁵Eddington, A. *The Internal Constitution of the Stars*. University Cambridge Press. Recuperado de: <https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.165852/page/n39/mode/2up>

²⁶Es preciso mencionar que, Chandrasekhar inició sus estudios sobre la materia comprimida a partir del estudio de la mecánica cuántica mediante la obra de Arnold Sommerfeld “Atomic structure and Spectral lines”. También, del trabajo realizado por el físico inglés R. H Fowler quien publicaría un artículo titulado “On dense matter” a partir de la obra de Eddington de 1926. Véase en: Thorne, K. (1994). “Agujeros negros y tiempo curvo” Capítulo IV: El misterio de las enanas blancas. - Sommerfeld, A. (1923) “Atomic structure and Spectral lines”. Recuperado de: <https://archive.org/details/0244-pdf-atomic-structure-and-spectral-lines-arnold-sommerfeld-2/page/n1/mode/2uphttps://archive.org/details/0244-pdf-atomic-structure-and-spectral-lines-arnold-sommerfeld-2/page/n1/mode/2up> - Fowler, R. (1926). *On Dense Matter* Royal Astronomical Society. 87 pp. (114-122). Recuperado de: <https://academic.oup.com/mnras/article/87/2/114/1058897>

para este tipo de estrellas (Thorne, K. 1994).

Formación estelar y condiciones de equilibrio:

La formación de las estrellas se origina en el medio interestelar, específicamente en las regiones enriquecidas de átomos de hidrógeno y helio que al ser tan densas se combinan para convertirse en nubes moleculares (Véase en: Figura 3.3). En ellas, los procesos de no-equilibrio cobran un papel fundamental, ya que para el nacimiento estelar, la nube se contrae por acción de la gravedad creando una protoestrella, que consume materia para aumentar su masa (Bennett, J. et al, 2018).

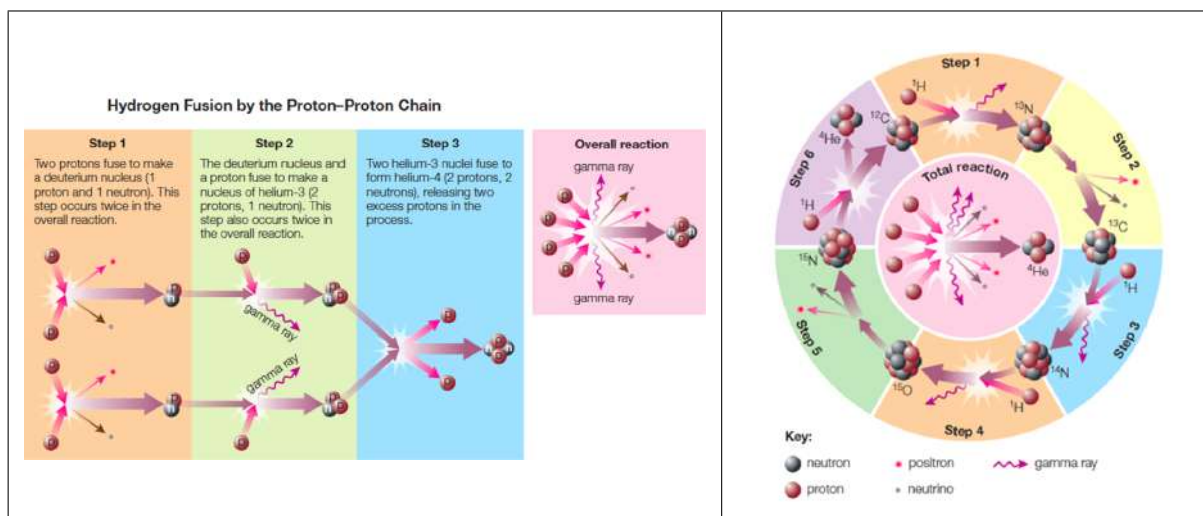
Conforme capta materia de su alrededor, el núcleo de esta protoestrella aumenta su temperatura originando allí procesos de fusión nuclear, las cuales la equilibran de la contracción gravitatoria. De este modo, cuando se inician estos mecanismos termonucleares al interior, nace una estrella la cual dependiendo de su masa se ubica en la secuencia principal del diagrama de H-R. Es fundamental mencionar que, si bien en su mayoría las estrellas se conforman de hidrógeno y helio (al ser abundantes en el universo), ocurren una serie de reacciones nucleares (nucleosíntesis estelar), que generan elementos químicos más pesados²⁷.



Figura 3.3: Pilares de la creación tomada por el telescopio espacial James Webb de la NASA. Tomada de: <https://reader.digitalbooks.pro/content/preview/books/55547/book/OEBPS/capitulo-1.html>

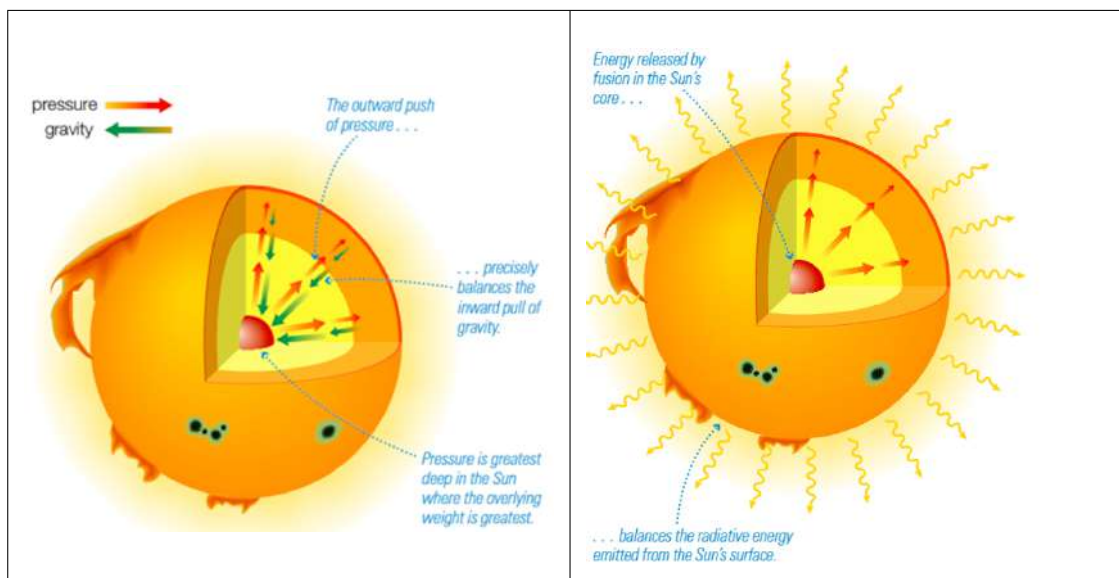
²⁷La posibilidad de considerar las reacciones nucleares como fuente de energía de las estrellas provino de Arthur Eddington en 1920. Sin embargo, años más tarde en 1939 Hans Bethe estableció la posibilidad de la fusión de hidrógeno y helio mediante las cadenas protón-protón: Bethe, H. (1939). “Energy production in Stars” Physical Review. Vol. 55, New York. Recuperado de: <https://journals.aps.org/pr/pdf/>

Los procesos de nucleosíntesis estelar que más se conocen se producen en la mayoría de las estrellas que se encuentran en la secuencia principal del diagrama H-R para la fusión del hidrógeno. Sin embargo, se pueden distinguir dos tipos, la primera denominada cadena protón-protón que ocurre en cuerpos estelares menos masivos que el Sol y la segunda el ciclo CNO que se lleva a cabo en aquellas que poseen mayor masa. Cada uno de ellos, es indispensable para la estabilidad que debe tener una estrella (Véase en: Cuadro 3.3).



Cuadro 3.3: Ilustración de los procesos de nucleosíntesis estelar. A la izquierda se presenta una explicación de la cadena protón-protón y a la derecha el ciclo CNO. Tomado de: Bennett, J. et al (2018). “The cosmic perspective” (p. 294 y 348).

Así pues, es clave reconocer que para que una estrella exista deben existir algunas condiciones de equilibrio, tanto mecánico como térmico. El primero de ellos, es el equilibrio hidrostático que, de acuerdo con Bower y Seggewiss (2008) hace alusión a “The gravitational force which holds the gaseous sphere (star) together is balanced by the internal pressure (...) everywhere in the star.” (p. 53) [La fuerza gravitacional que mantiene unida la esfera gaseosa (estrella) se equilibra con la presión interna en todas las partes de la estrella.] Tal presión que ejerce la estrella para mantener este estado, se produce en su núcleo, a partir de la energía liberada por la fusión nuclear (Véase en: Cuadro 3.4 izquierda).



Cuadro 3.4: Ilustración del equilibrio hidrostático y energético del Sol. Tomado de: Bennett, J. et al (2018). “The cosmic perspective” (p. 290- 291).

Por otro lado, se encuentra una segunda condición de equilibrio que hace alusión al balance energético (Véase en: Cuadro 3.4 derecha); allí, toda la energía que se produce en el interior, se transporta hacia la superficie estelar y es irradiada al exterior²⁸. Lo cual, es parte indispensable de la compensación entre la presión y la gravedad, mencionadas anteriormente, puesto que, “if fusion in the core did not replace the energy radiated from the surface, thereby keeping the total thermal energy content constant, then gravitational contraction would cause the Sun to shrink and force its core temperature to rise.” [Si la fusión en el núcleo no sustituyera la energía irradiada desde la superficie manteniendo así constante el contenido total de energía térmica, la contracción gravitatoria haría que el Sol se encogiera y obligaría a aumentar la temperatura de su núcleo] (Bennett, J. et al, 2018, p. 291). Por ende, estas condiciones resultan vitales tanto para el Sol, como para el resto de estrellas que componen el Universo.

Bajo estas consideraciones, es clave reconocer que las condiciones de equilibrio de una estrella hacen parte fundamental de su proceso de evolución. Sin embargo, una propiedad que determina en gran medida esta compensación es la *masa*, que desempeña un rol primordial a lo largo del ciclo estelar. De acuerdo con el diagrama H-R, las estrellas que son

²⁸Es importante mencionar que la energía transportada en las estrellas, se realiza por tres mecanismos de transporte: Radiación, convección y conducción.

masivas consumen más rápido su combustible nuclear, haciendo que su vida sea inferior, comparada con aquellas que son iguales o menores al Sol. De ahí que, sus etapas finales sean desde enanas blancas, hasta supernovas o agujeros negros.

Para determinar el desarrollo evolutivo de las estrellas, se precisa mencionar el trabajo realizado por Subramanyan Chandrasekhar²⁹ que, como se mencionó anteriormente, se especializó en estrellas compactas denominadas enanas blancas. Los estudios alrededor de ellas, le permitió inferir que el núcleo estaba compuesto por “celdas” de electrones cuyo equilibrio con la gravedad lo hacía posible la *presión degenerativa de electrones*³⁰. Sin embargo, a partir de sus investigaciones orientadas a los cálculos de compresión adiabática³¹, concluyó que existe una masa máxima para la cual esta presión degenerativa mantiene compensada a la estrella contra la gravedad.

Lo anterior, fue expuesto en el artículo “Stellar configurations with degenerate cores” [Configuraciones estelares con núcleos degenerados]³², donde Chandrasekhar a través de una robusta demostración, que yace de sus trabajos anteriores³³, establece un límite de

²⁹La Real Academia Sueca de las ciencias, condecoró a Subramanyan Chandrasekhar con el nobel de física de 1983 por sus trabajos alrededor de los procesos físicos de estructura y evolución de las estrellas: “for his theoretical studies of the physical processes of importance to the structure and evolution of the stars”: <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/chandrasekhar-lecture.pdf>

³⁰De acuerdo con Thorne (1994), la degeneración electrónica se puede entender mediante la dualidad onda/partícula. Cuando la materia se comprime a altas densidades, cada electrón queda confinado en una celda con varios electrones vecinos e inicia a comportarse como onda que emite ciertas longitudes de onda pequeñas; que se traduce a radiación electromagnética (fotones) de alta energía como los rayos x. Este comportamiento hace que el movimiento sea cada vez más rápido, de manera que el grado de agitación lo incrementa. Por ende, la presión que se genera no es más que la respuesta a la confinación de electrones que se produce en estas enormes densidades. Véase en: Thorne, K. (1994). “Agujeros negros y tiempo curvo” Capítulo IV: El misterio de las enanas blancas.

³¹En una compresión adiabática se realiza trabajo sobre el sistema, de manera que su volumen disminuye, mientras la energía interna aumenta.

³²Chandrasekhar, S. (1934). “Stellar configurations with degenerate Cores”. The Observatory, Vol. 57, p. 373-377. Recuperado de: https://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-iarticle_query?1934Obs....57..373C&defaultprint=YES&filetype=.pdf

³³Uno de estos trabajos fue “The highly collapsed configurations of a Stellar Mass” publicado en 1931. Recuperado de: <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1931MNRAS...91..456C>

masa de $1,44M_{\odot}$ (M_{\odot} Masa solar) en la cual estas estrellas pueden convertirse en enanas blancas. De ahí que, señala el físico:

Finally, it is necessary to emphasize one major result of the whole investigation, namely, that it must be taken as well established that the life-history of a star of small mass must be essentially different from... a star of large mass. For a star of small mass, the natural white dwarf stage is an initial step towards complete extinction. A star of large mass cannot pass into white dwarf stage and one is left speculating on other possibilities. [Finalmente, es necesario enfatizar un resultado importante de toda la investigación, a saber, que debe darse por bien establecido que la historia vital de una Estrella de pequeña masa debe ser esencialmente diferente de . . . una estrella gran masa. Para una estrella de masa pequeña, la fases de enana blanca natural es un paso inicial hacia la extinción completa. Una estrella de gran masa no puede pasar a la fase de enana blanca y no queda más remedio que especular sobre otras posibilidades.] (Chandrasekhar, S. 1934, p. 377)

Por esta razón, es posible considerar que la fase evolutiva final del Sol y estrellas iguales o menores que $1,44M_{\odot}$, será entonces una enana blanca.

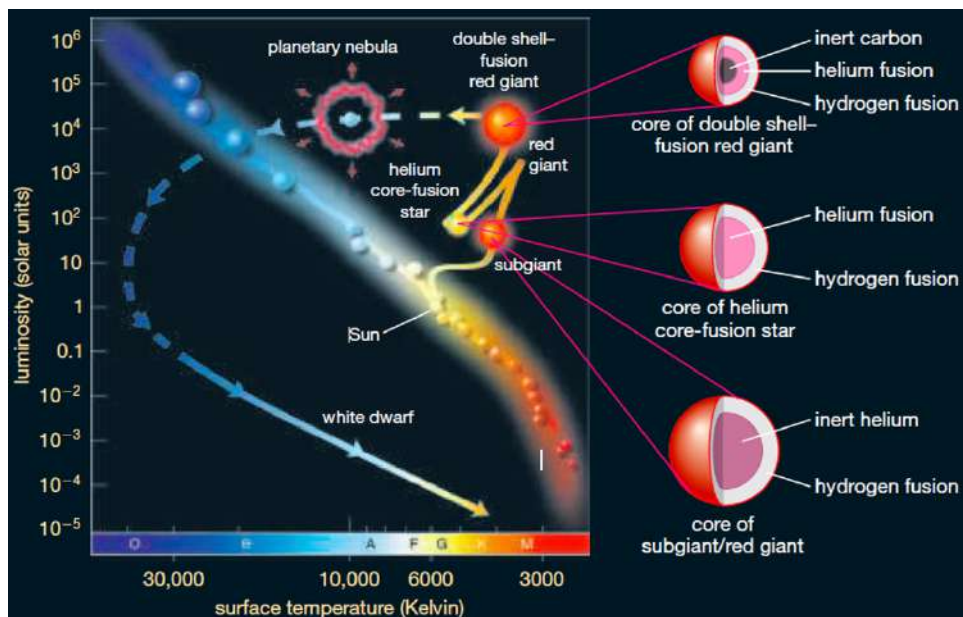


Figura 3.4: Ilustración de la evolución del Sol en el diagrama H-R. Tomado de: Bennett, J. et al (2018). "The cosmic perspective" (p. 291).

Sin embargo, es relevante mencionar que, durante un largo tiempo estas estrellas estarán atravesando una serie de cambios que dependen de sus procesos termonucleares. Para el Sol, por ejemplo, estas transformaciones se observan en el diagrama H-R (Véase en: Figura 3.4).

El Sol se compone fundamentalmente de hidrógeno, al tener una temperatura tan elevada, existe la posibilidad de que tanto protones como electrones se encuentren separados. Por ello, en vez de repelerse (de acuerdo con la fuerza eléctrica) los protones pueden fusionarse para formar helio. No obstante, existen también otras reacciones que hacen posible esta conversión de H a He. De acuerdo con Luminet (1991) “(...) incluso caliente, al hidrógeno le cuesta arder: una protón debe esperar en media... catorce mil millones de años para fusionarse con otros tres protones de la reacción protón-protón” (p.89). Por ello, durante gran parte de su vida, el Sol se encontrará en la secuencia principal, fusionando hidrógeno en su interior.

Al agotar todo este hidrógeno de su interior, se desplaza por el diagrama H-R hacia la derecha, por ende, deja de pertenecer a la secuencia principal para convertirse en una subgigante y luego una gigante roja (parte superior derecha). Allí existen una serie de cambios en cuanto a su luminosidad, ya que aumenta; mientras su temperatura desciende. Por esta razón, las capas externas se desprenden, formando así una nebulosa planetaria, la cual en su interior contiene un núcleo, que corresponde a una enana blanca con una luminosidad y temperatura considerable³⁴.

Teniendo en cuenta lo anterior, los estudios alrededor de la evolución estelar tomaron una relevancia significativa en el campo de la astrofísica. La posibilidad de cuerpos celestes mayores al límite de Chandrasekhar se propusieron alrededor del año 1930, precisamente después del descubrimiento del neutrón en 1932 por parte de James Chadwick³⁵.

³⁴“La estructura mecánica de una enana blanca depende esencialmente del comportamiento del mar de electrones, mientras que su estructura térmica depende del movimiento de los núcleos. Como los electrones degenerados conducen muy bien el calor, el interior de una enana blanca se asemeja a un trozo de metal incandescente”. Véase en: Luminet, J. (1991). “Agujeros negros”. Madrid – España, Alianza Editorial. Capítulo 5: Ceniza y diamante.

³⁵Chadwick, J. (1932). “The existence of a Neutron”. Nature. 129. pp. (692-708). Recuperado de:

La existencia de estrellas más compactas las establecieron Fritz Zwicky y Walter Baade, quienes de manera análoga propusieron que los neutrones podían generar una presión degenerativa mayor comparada con los electrones. Esto, se derivó de su interés por el núcleo encontrado en la nebulosa de cangrejo, que era un resto de supernova (Luminet, 1991).

En su trabajo “Cosmic rays from super-novae” [Rayos cósmicos de supernovas]³⁶ publicado en 1934, Zwicky y Baade exponen a manera de conclusión que,

With all reserve we advance the view that a super-nova represents the transition of an ordinary star into a neutron star, consisting mainly of neutrons. Such a star may possess a very small radius and an extremely high density. As neutrons can be packed much more closely than ordinary nuclei and electrons, the ”gravitational packing. energy in a cold neutron star may become very large, and, under certain circumstances, may far exceed the ordinary nuclear packing fractions. A neutron star would therefore represent the most stable configuration of matter as such.” [Con todas las reservas, avanzamos la mirada de que una supernova representa la transición de una estrella ordinaria a una estrella de neutrones, compuesta principalmente por neutrones. Una estrella de este tipo puede tener un radio muy pequeño y una densidad extremadamente alta. Dado que los neutrones pueden empaquetarse mucho más estrechamente que los núcleo y electrones ordinarios, la energía del “empaquetamiento gravitatorio” es una estrella de neutrones fría puede llegar a ser muy grande y, en determinadas circunstancias, puede superar con creces las fracciones de empaquetamiento nuclear ordinarias. Una estrella de neutrones representaría, por tanto, la configuración más estable de la materia como tal] (Zwicky y Baade, 1934, p. 263).

La existencia de estrellas de neutrones en el universo, fue de gran interés para diversos científicos de la época, esto, por sus condiciones extremas de presión, temperatura,

<https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rspa.1932.0112>

³⁶Baade, W y Zwicky, F. (1934) “Cosmic rays from super-novae” Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. Vol. 20. pp. (259-263). Recuperado de: <https://www.pnas.org/doi/epdf/10.1073/pnas.20.5.259>

densidad, campo magnético, entre otros. El primer modelo que se estableció sobre su estructura fue propuesto por Robert Oppenheimer y George Volkoff en su artículo “On massive Neutron cores”³⁷ [Sobre los núcleos masivos de neutrones] de 1939. Allí, realizan un estudio sobre el equilibrio hidrostático para estos cuerpos celestes, usando la ecuación de estado para el gas de Fermi y la relatividad general, que había sido investigada también por Richard Tolman³⁸. Con ello, fue posible establecer una masa crítica para estrellas de neutrones, la cual se calculó inicialmente de $\sim 0,7M_{\odot}$; no obstante, se reconoce actualmente que es de $1,5M_{\odot}$ y $3,0M_{\odot}$ y que se considera como el límite de Tolman-Oppenheimer-Volkoff para estrellas de este tipo³⁹.

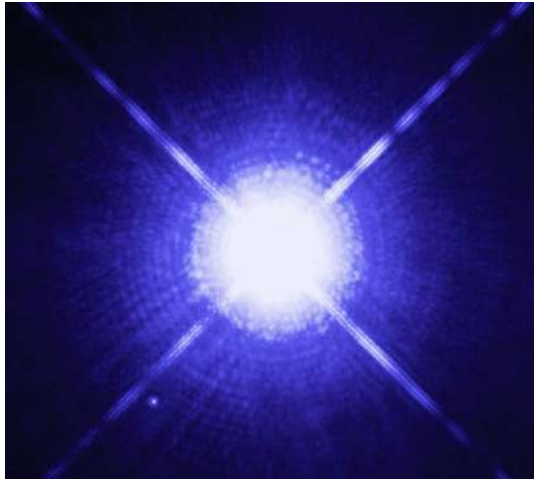
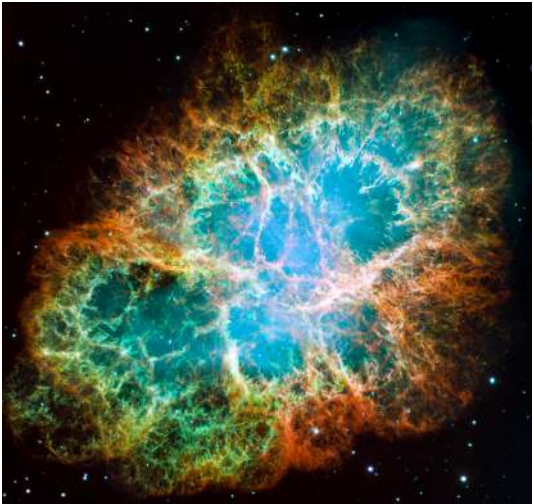
Con estos trabajos, fue posible considerar que para estrellas mayores a límite de TOV, el colapso de las estrellas era obligatoria, tal como afirma Thorne (1994) “(...) cuando muere una estrella más masiva que aproximadamente 2 soles, la implosión no puede producir una enana blanca, ni una estrella de neutrones, ni ningún otro tipo de estrella fría muerta.” (p.381); de acuerdo con Oppenheimer, podía crear un agujero negro.

Teniendo en cuenta lo anterior, se presenta el siguiente cuadro comparativo en el cual se realiza un resumen frente al valor crítico que pueden tomar las estrellas en su etapa final de evolución. Así pues, se menciona el valor límite de las masas tanto para el límite de Chandrasekhar como para el de Tolma-Oppenheimer y Volkoff. Finalmente, se exponen algunas imágenes tanto de enanas blancas como de estrellas de neutrones.

³⁷Oppenheimer, R. y Volkoff, G. (1939) “On Massive Neutron Cores”. Physical Review. Vol. (55) pp. (374-381). Recuperado de: <http://www.weylmann.com/oppenheimer1.pdf>

³⁸Tolman, R. (1939) “Static solution of Einstein’s Field Equation for Spheres of Fluid”. Physical Review. Vol. (55) pp. (364-373).

³⁹Es importante mencionar que, la primera evidencia observacional de las estrellas de neutrones fue en 1967 por parte de una estudiante llamada Jocelyn Bell, quien descubrió una extraña fuente de ondas de radio, las cuales encendían y apagaban en intervalos de 1,337301 segundos y las cuales fueron denominadas púlsares. A finales de 1968, se descubrió que dicha emisión provenía del centro de dos nebulosas, la de la vela y cangrejo. Se sabe ahora que, los púlsares son estrellas de neutrones abandonadas por las explosiones de supernovas. Véase en: Bennett, J. et al (2018). “The cosmic perspective”. Pearson education, Inc. United States of America. Capítulo 14: The bizarre stellar graveyard.

Límites de masas estelares	
Límite de Chandrasekhar	Límite de Tolman-Oppenheimer-Volkoff
<p>Las estrellas cuya masa sea menor o igual a $1,44M_{\odot}$, se convierten progresivamente en una enana blanca. En la fotografía, se observa un sistema binario que muestra a Sirio A que se encuentra en todo el centro y a Sirio B que se encuentra en el costado inferior izquierdo. Fueron las primeras enanas blancas en ser descubiertas. Esta fotografía fue tomada por el telescopio espacial Hubble.</p> 	<p>Las estrellas que exceden $3,0M_{\odot}$, pueden estallar a manera de supernovas. En su interior, el núcleo que queda allí se comprime hasta convertirse en una estrella de neutrones en forma de púlsar o magnetar. En la fotografía, se muestra la nebulosa del cangrejo, la cual en su interior contiene una estrella de neutrones. Esta fotografía fue tomada por el telescopio espacial Hubble.</p> 

Cuadro 3.5: Fotografías de una estrella binaria enana blanca (costado izquierdo) (Imagen tomada de: <https://esahubble.org/images/heic0516a/>) y la nebulosa de cangrejo que contiene una estrella de neutrones (costado derecho) (Imagen tomada de: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/messier-1-the-crab-nebula>)

3.2.2. Colapso gravitacional estelar

*“(..) what is the ultimate fate of a system,
in gravitational collapse?”*

Stephen Hawking y Roger Penrose, 1970.

Luego de establecer la masa máxima para las estrellas de neutrones, seis meses más tarde, Robert Oppenheimer junto a Hartland Snyder propusieron un primer modelo de colapso estelar mediante la teoría general de la relatividad. En este trabajo, que publicaron en 1939 en el artículo denominado “On continued gravitational contraction” [Sobre la contracción gravitacional continua]⁴⁰, establecieron una serie de condiciones para modelar dicha implosión, las cuales residen en suponer una estrella esférica, estática⁴¹, lo suficiente masiva para sobrepasar el límite de TOV y cuya presión al interior fuera cero. De ahí que, la hipótesis que establecieron fue la siguiente:

When all thermonuclear sources of energy are exhausted a sufficiently heavy star will collapse. Unless fission due to rotation, the radiation of mass, or the blowing off of mass by radiation, reduce the star’s mass to the order that of the sun, this contraction will continue indefinitely (...) [Cuando se agoten todas las fuentes termonucleares de energía, una estrella suficientemente pesada se colapsará. Salvo que la fisión debida a la rotación, la radiación de masa o el soplido de masa por radiación reduzcan la masa de la estrella al orden de la del Sol, esta contracción continuará indefinidamente.] (Oppenheimer y Snyder, 1939, p. 455)

Es relevante mencionar que, el estudio de la implosión gravitacional se realizó considerando un marco de referencia comóvil en la cual se hicieron una serie de cálculos que permitieron aproximar el radio de la estrella al radio de Schwarzschild⁴². De ahí que, el

⁴⁰Oppenheimer, R y Snyder, H. (1939) “On continued gravitational contraction” Vol. 56, Physical Review. pp. (455-459). Recuperado de: <https://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.56.455>

⁴¹Es importante mencionar que ambos científicos utilizaron la métrica derivada de la solución de Schwarzschild

⁴²En este caso, se asume un observador en la superficie de la estrella que colapsa junto con ella. El marco de referencia comóvil entonces se mueve junto con la partícula o en este caso junto al cuerpo estelar en implosión.

análisis del proceso de colapso gravitatorio estelar, teniendo en cuenta tales parámetros, permitió a ambos científicos exponer las implicaciones de la relatividad general frente a la luz y el tiempo, en casos donde los campos gravitacionales resultan ser extraordinariamente mayores. Uno de los análisis más relevantes en el proceso de colapso gravitacional, es la dilatación del tiempo la cual se deriva del principio de equivalencia que antecede la relatividad general. En este caso, uno de los factores que influye directamente en su medida será el campo gravitatorio producido por la concentración de materia. Por esta razón, la percepción temporal de un observador que colapsa junto con la estrella a uno externo, que se encuentre a una distancia determinada será diferente⁴³.

Según Luminet (1991), durante este proceso ocurre una especie de congelación temporal, la cual se da por la elasticidad del tiempo que es propia de la relatividad general. Este fenómeno de ralentización del tiempo

(...) que se traduce por intervalos dilatados de recepción de las señales, se manifiesta igualmente por una disminución de la frecuencia aparente de la radiación que sale de la estrella, puesto que la frecuencia cuenta el número de vibraciones de la onda luminosa por segundos.(Luminet, 1991, pp. 158-159)

Por esta razón, causa también un desplazamiento en las longitudes de onda lumínicas que son percibidas por un observador que se encuentra al exterior de una estrella colapsando. Lo cual, es posible asociar al efecto Doppler de la luz (Véase en: Figura 3.5), donde la longitud de onda tiene a acortarse a medida que el objeto emisor se acerca al receptor (Blueshift); mientras se alarga conforme se aleja (Redshift)⁴⁴.

⁴³“(...) el tiempo propio de colapso, medido por un reloj situado en la superficie de la estrella, es distinto del tiempo aparente de colapso, medido por un reloj lejano e independiente.” Véase en: Luminet, J. (1991). “Agujeros negros”. Madrid – España, Alianza Editorial. Capítulo 9: El horizonte quimérico

⁴⁴Es importante mencionar que el término “azul” y “rojo” hace alusión al espectro electromagnético de la luz. Por ello, es clave mencionar que, “(...) astronomers use the terms blueshift and redshift even when they aren’t talking about visible light” [Los astrónomos utilizan los términos desplazamiento azul y desplazamiento rojo incluso cuando no están hablando de la luz visible] (Bennett, J. et al (2018). “The cosmic perspective”, p.118)



Figura 3.5: Ilustración del corrimiento al rojo para la luz que emite una estrella que se aleja a la Tierra. Tomado de: <https://www.enterarse.com>

Estas consecuencias en las percepciones del tiempo y de la luz son posible visualizarlas a través de la configuración de la estructura causal⁴⁵, la cual es posible evidenciar en este esquema (Véase en: Figura 3.6) que representa un proceso de colapso estelar. Allí, conforme pasa el tiempo (verticalmente hacia arriba) la materia implosiona paulatinamente acercándose cada vez más a $r = 2m$ que es el horizonte de eventos (event horizon). La emisión de señales luminosas ($E1, E2, E3, \dots$), por ejemplo, se reflejan desde la superficie de la estrella (Surface star) hasta un observador externo (Distant astronomer)⁴⁶.

Durante el proceso de colapso gravitacional, las señales que se emiten desde la estrella entre $E1$ y $E3$ (outgoing light rays), las recibe el observador externo en ciertos intervalos de tiempo que van siendo mayores ($R1, R2, R3$). Al momento de emitir luz en $E4$ (justo en $r=2m$), ésta no logra llegar a donde se encuentra el sistema de referencia distante, ya que parece quedar “atrapada” en el horizonte de eventos. Lo anterior, permite inferir que, la frecuencia de cada señal va disminuyendo y con ello, la longitud de onda va desplazándose hacia el rojo conforme la materia estelar implosiona.

⁴⁵El principio de causalidad -en la que la causa precede al efecto- es una de las ideas más importantes en las ciencias. Especialmente, en la relatividad trae consigo un significado relevante al considerar que ninguna señal puede ser igual o mayor a la velocidad de la luz. Por otro lado, es clave recordar que, “(...) la estructura galileo-newtoniana de espacio y de tiempo absolutos, se borra frente a una nueva estructura de cuatro dimensiones, el espacio-tiempo de Minkowski” (Luminet, 1991, p. 45).

⁴⁶Las señales luminosas se representan a través de los conos de luz, los cuales desde la perspectiva relativista permiten relacionar entre sí las causas y efectos. El borde de este cono hace alusión precisamente a la velocidad de la luz, la cual es la más rápida en el universo.

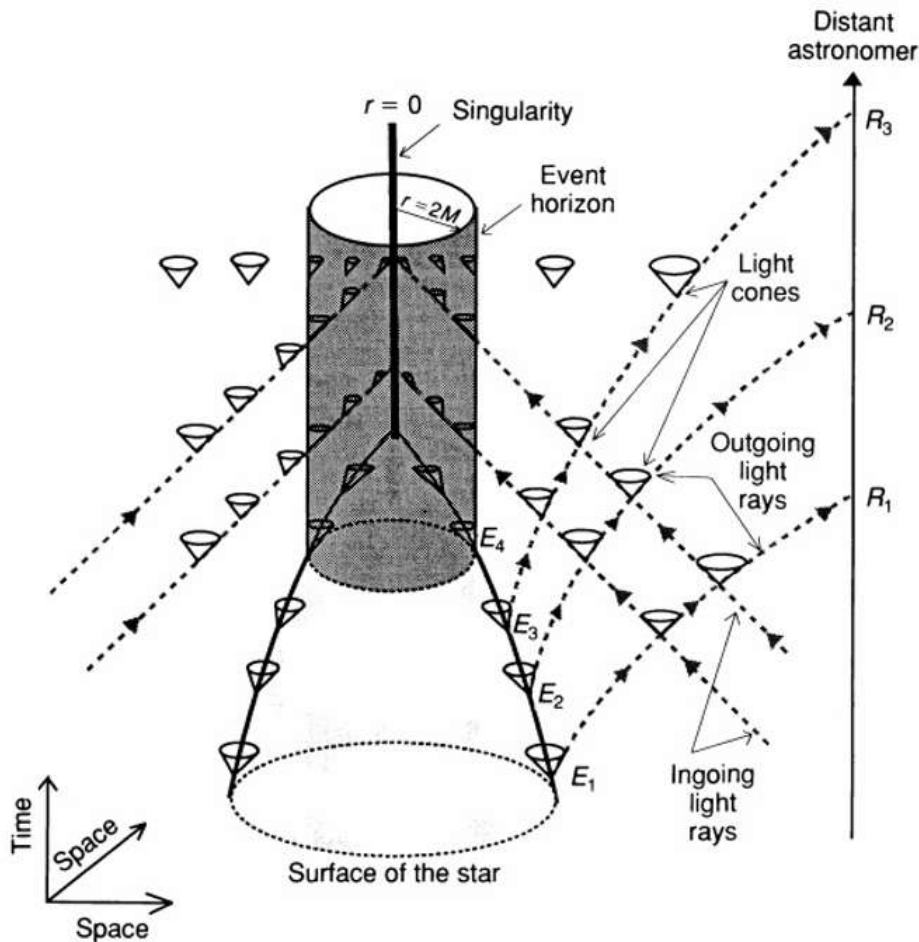


Figura 3.6: Esquema de formación de un agujero negro a través del colapso gravitacional. Tomado de: Luminet, J. (1991). “Agujeros negros”. Madrid – España, Alianza Editorial. Capítulo 9: El horizonte quimérico. (p.155)

Por otro lado, es relevante resaltar que, el resultado del análisis del colapso gravitacional a través de la relatividad general realizado por Oppenheimer y Snyder, trajo consigo implicaciones significativas no solo alrededor de la luz y el tiempo, también del elemento resultante de dicha implosión, que se estableció bajo el nombre de estrella colapsada o congelada; que actualmente se denominada Agujero negro⁴⁷. Así mismo, el estudio de

⁴⁷“At a conference in New York in 1967, Dr. Wheeler, seizing on a suggestion shouted from the audience, hit on the name “black hole” to dramatize this dire possibility for a star and for physics.” [En una conferencia en Nueva York en 1967, el Dr. Wheeler, aprovechando una sugerencia formulada por el público, llamó “agujero negro” a esta posibilidad funesta para una estrella y para la física] Recuperado de: Overbye, D. (2008). “John A. Wheeler, Physicist Who Coined the Term ‘Black Hole,’ Is Dead at 96.”

campos gravitacionales tan fuertes, desafió para ese entonces las leyes de la física tal como se conocían hasta ese entonces, especialmente en lo que refiere a la gravedad, ya que abrió la posibilidad de hablar de ella desde la perspectiva de la mecánica cuántica.

9

3.2.3. Clasificación, estructura y detección de agujeros negros

“The black holes of nature are the most perfect macroscopic objects there are in the universe: the only elements in their construction are our concepts of space and time. And since the general theory of relativity provides only a single unique family of solutions for their descriptions, they are the simplest objects as well.”
Subramanyan Chandrasekhar, 1983.

Los agujeros negros son regiones del espacio-tiempo que se forman a partir de grandes concentraciones de masa (del orden de millones de M_{\odot}) que generan campos gravitacionales lo suficientemente fuertes para compactarse e impedir que todo tipo de materia y radiación escape. Una de las posibilidades de su formación, es a través del colapso gravitacional de una estrella masiva (mayor al LTOV) la cual ocurre durante las últimas fases de su evolución estelar. No obstante, los estudios realizados desde el año 1964 permitieron ahondar en su investigación, reconociéndolos no sólo como cuerpos pasivos que absorben materia del espacio sin retornarla, también, objetos dinámicos que podían rotar e incluso emitir energía⁴⁸. De ahí que, su exploración permitió clasificarlos por su masa, origen y propiedades.

New York Times. Recuperado de: <https://www.nytimes.com/2008/04/14/science/14wheeler.html>

⁴⁸A la década entre 1964 y 1975 se le denominó la edad de oro. Esto, por el desarrollo significativo en el campo de la astrofísica relacionada con el estudio de los agujeros negros a partir de la relatividad general. A partir de ello, fue posible determinar que rotan junto con su espacio-tiempo circundante, laten y “no tienen pelo”. El teorema de “no pelo” hacía referencia a la no existencia de protuberancias en el horizonte de eventos de un agujero negro. De acuerdo con este, tales desigualdades en la circunferencia crítica eran transformada en ondas gravitacionales dado que el horizonte de eventos debía permanecer totalmente esférico. Véase en: Thorne, K. (1994). “Agujeros negros y tiempo curvo” Capítulo VII: La edad de oro.

Clasificación de agujeros negros:

Los agujeros negros que comúnmente se conocen son de formación estelar, los cuales emergen del colapso gravitatorio de estrellas masivas. Sin embargo, existen otros mecanismos que permiten clasificarlos en primordiales y supermasivos de acuerdo con su masa y origen, tal como se muestra a continuación:

- *Agujeros negros primordiales*: La posibilidad de la existencia de este tipo de agujeros negros, fue expuesta por Hawking en el año 1971 en su trabajo denominado “Gravitationally collapsed objects of very low mass” [Objeto de muy baja masa colapsados gravitacionalmente]⁴⁹. Allí, afirma Hawking que el inicio del universo debió ser poco homogéneo de manera que, hubo regiones que se comprimieron por colapso gravitatorio y formaron agujeros negros primordiales⁵⁰.
- *Agujeros negros de formación estelar*: El destino final de una estrella que supera el LTOV, puede generar en principio una supernova, cuyo interior se colapsa hasta convertirse en un agujero negro. Es importante mencionar que, la mayoría de estrellas se encuentran en sistemas binarios. Por ende, si una de estas estrellas forma un agujero negro, la otra, puede desprender material cuyo objeto compacto puede absorber formando un disco de acreción a su alrededor.
- *Agujeros negros supermasivos*: En la década de 1940 por primera vez se estableció la probabilidad de la existencia de núcleos activos de galaxia. Esto, se estableció para explicar las luminosidades extremas que se veían en el centro de las galaxias. Este modelo, afirma que, el objeto central es un agujero negro supermasivo rodeado por un disco de acreción arremolinado de gas muy caliente del orden de millones o

⁴⁹Hawking, S. (1971). “Gravitationally collapsed objects of very low mass.” Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 152, pp. (75–78). Recuperado de: <https://doi.org/10.1093/mnras/152.1.75>

⁵⁰De acuerdo con Luminet (1991), “(...) se hubieran podido producir «desde el exterior» agujeros negros minúsculos, que tienen la masa de una montaña y el tamaño de una partícula elemental, mientras que los agujeros negros del universo actual no pueden formarse más que por colapso grandes cantidades de materia” (p. 233). Véase en: Luminet, J. (1991). “Agujeros negros”. Madrid – España, Alianza Editorial. Capítulo 14: El agujero negro cuántico.

billones de masas solares⁵¹.

Por otro lado, se estableció otra manera de clasificar los agujeros negros a partir del desarrollo de otras soluciones de campo de Einstein, que se encontraron durante la edad de oro y que permitieron caracterizar a estas regiones con carga eléctrica y momento angular. Estas nuevas métricas fueron las siguientes:

- *Agujero negro de Schwarzschild*: No tiene carga eléctrica, ni momento angular (Sin rotación).

Métrica de Schwarzschild:[20]

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2m}{r}\right)dt^2 - \left(1 - \frac{2m}{r}\right)^{-1}dr^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2)$$

- *Agujero negro de Reissner-Nordstrom*⁵²: Tiene carga eléctrica (Q). No tienen momento angular (Sin rotación). En el estudio de los agujeros negros, se reconoce como la **Métrica de Reissner-Nordstrom**[20]
- *Agujero negro de Kerr*⁵³: No tiene carga eléctrica. Tiene momento angular (J) y posee una ergosfera. En el estudio de los agujeros negros, se reconoce como la **Métrica de Kerr** [42]
- *Agujero negro de Kerr-Newman*⁵⁴: Tiene carga eléctrica (Q), momento angular (J)

⁵¹“(…) The gravitational potential energy of matter falling toward a black hole is converted into kinetic energy, and collisions between in falling particles convert kinetic energy into thermal energy.” [La energía potencial gravitatoria de la materia que cae hacia un agujero negro se convierte en energía cinética y las colisiones entre las partículas en caída convierten la energía cinética en energía térmica] (Bennett, J. et al; 2018, p. 433)

⁵²Reissner, H. (1916). “Über die Eigengravitation des elektrischen Feldes nach der Einsteinschen Theorie” *Annalen der Physik*. 355. pp. (106-120) y Nordström, G. (1918). “On the energy of the gravitational field Einstein’s theory” *Koninklijke Nederlandsche Akademie van Wetenschappen Proceedings*, vol. 20, p.1238-1245.

⁵³Kerr, R. (1963). “Gravitational field of a spinning mass as an example of algebraically special metrics”. *Physical review letters*. Vol 11. pp. (237-238). Recuperado de: http://old.phys.huji.ac.il/~barak_kol/Courses/Black-holes/reading-papers/Kerr.pdf. “On the energy of the gravitational field Einstein’s theory” *Koninklijke Nederlandsche Akademie van Wetenschappen Proceedings*, vol. 20, p.1238-1245.

⁵⁴En esta métrica, se toma en cuenta el trabajo realizado por Kerr en 1963 y el estudio de Newman, T. (1965). “Metric of a rotating charged mass”. *Journal of mathematical physics*. Vol. 6. pp. (918-919)

y posee una ergosfera. En el estudio de los agujeros negros, se reconoce como la **Métrica de Kerr-Newman**.

Estructura de un agujero negro:

Los estudios alrededor de los agujeros negros han permitido no sólo caracterizarlos a través de sus propiedades, también describirlos a partir de su estructura. Así como cualquier cuerpo astronómico, estas regiones espacio-temporales cuentan con una serie de partes (Véase en: Figura 3.7). Inicialmente, se consideraban únicamente el horizonte de eventos y la singularidad; no obstante también cuenta con un disco de acreción y una ergosfera para aquellos que rotan.

Horizonte de eventos: Hace referencia al límite existente entre el agujero negro y el espacio exterior. Se le conoce como punto de no retorno, ya que allí su velocidad de escape es igual a la de la luz. Por ende, nada que sobrepase esta frontera puede escapar. Esta parte corresponde además al radio de Schwarzschild, ya que cualquier cuerpo estelar que se contraiga más allá de esta medida, puede formar un agujero negro, en la cual este borde separa el núcleo en implosión del universo. De acuerdo con Bennett, J. et al; (2018) “(...) the event horizon gets its name because we have no hope of learning about any events that occur within it.” [el horizonte de sucesos recibe su nombre porque no tenemos ninguna esperanza de conocer ningún suceso que ocurra en su interior] (p. 372).

Disco de acreción: Son discos de gas que se encuentran alrededor de cuerpos celestes masivos tales como estrellas de neutrones o agujeros negros. Allí, “(...) the gravitational potential energy of matter falling toward a black hole is converted into kinetic energy, and collisions between infalling particles convert kinetic energy into thermal energy.” [la energía potencial gravitatoria de la materia que cae hacia un agujero negro se convierte en energía cinética, y las colisiones entre partículas que caen transforman la energía cinética en energía térmica] (Bennett, J. et al, 2018, pp. 433). Por esta razón, se caracterizan principalmente por emitir radiación electromagnética de rayos x, la cual permite detectarlos.

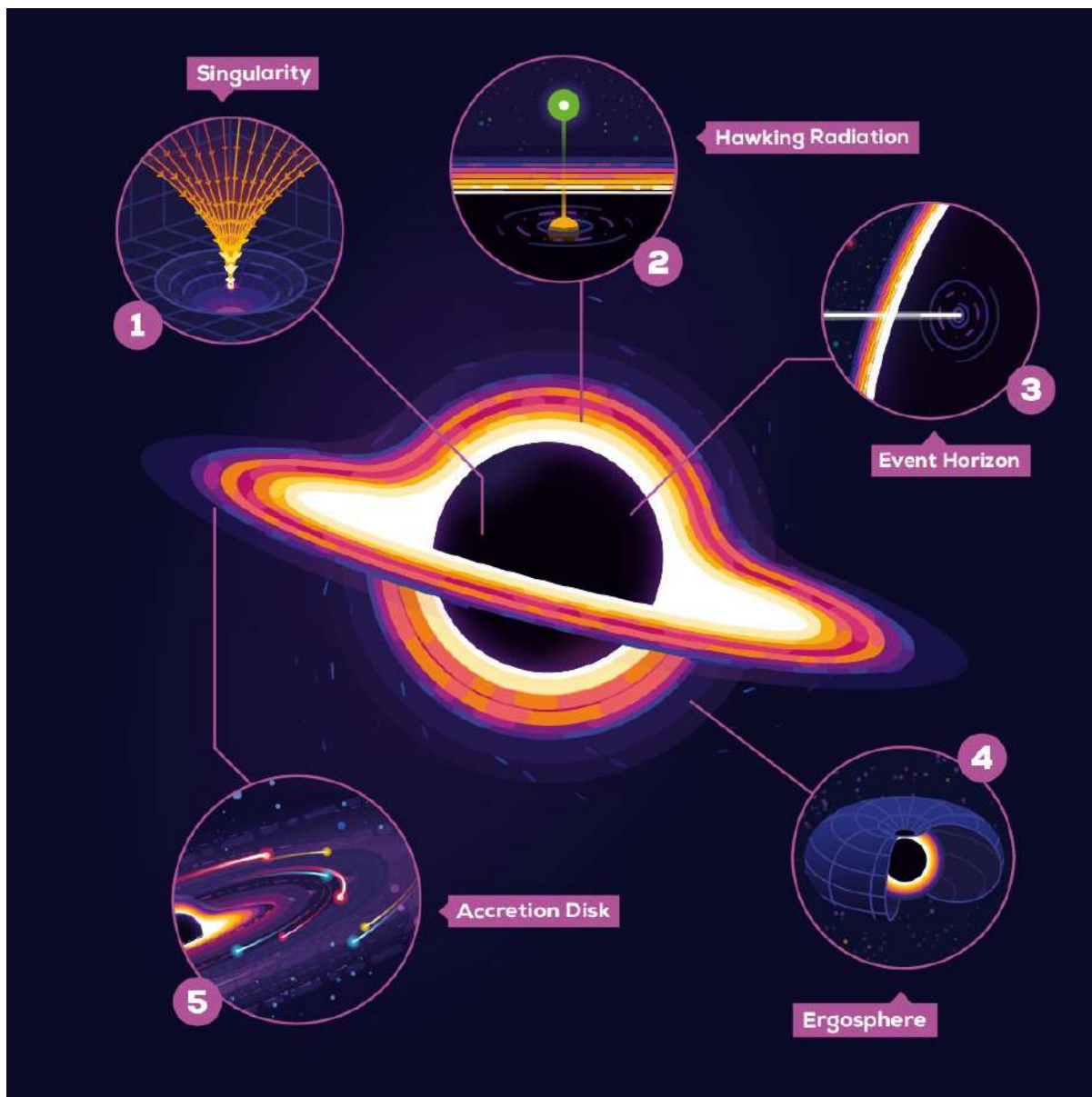


Figura 3.7: Ilustración de las partes de un agujero negro. 1. Singularidad 2. Radiación de Hawking 3. Horizonte de eventos 4. Ergosfera 5. Disco de acreción. Tomado de: Kurzgesagt (18 de febrero 2023). https://twitter.com/Kurz_Gesagt/status/1626945094380134406

Ergosfera: Es la región comprendida fuera del horizonte de sucesos de un agujero negro en rotación (métrica de Kerr), cuya estructura es elipsoidal, se “achata” en los polos y se ensancha en el “ecuador”. Así mismo, se conoce como un lugar de arrastre espaciotemporal donde no hay puntos en reposo, ya que solo cesa de girar a una distancia infinita. Uno de los estudios más sobresalientes de esta parte de los agujeros negros,

reposa en el trabajo elaborado por Roger Penrose en 1969 donde estableció la posibilidad de la extracción de energía a partir del Proceso Penrose⁵⁵

Singularidad: Es una región dentro de los agujeros negros la cual se caracteriza por la presencia de enormes concentraciones de materia, en donde las magnitudes físicas tales como la densidad y la gravedad son infinitas⁵⁶. Ésta se encuentra oculta por el horizonte de eventos la cual se forma durante el proceso de colapso gravitacional de una estrella. El estudio alrededor de ellas por parte de Penrose (1969) ha permitido considerar la posibilidad de ignorar la existencia de singularidades desnudas mediante la censura cósmica⁵⁷.

Detección de agujeros negros:

Uno de los rasgos principales de los agujeros negros es que no emiten luz, por ello, pensar en su detección es casi imposible. Sin embargo, la extrema gravedad que caracteriza a estas regiones espacio temporales puede influir en su entorno de modo que, es posi-

⁵⁵En este proceso, “(...) A particle (in) starts at infinity and falls into the ergosphere of a Kerr black hole. There it decays into two particles, (out) and (bh). Particle (bh) falls down through the horizon, but particle (out) escapes to infinity. It’s possible to arrange the decay so that escaping particle (out) carries more energy away to infinity than particle (in) carried in, thus extracting energy from the black hole.” [Una partícula (hacia adentro) parte del infinito y cae en la Ergosfera de un agujero negro de Kerr. Allí se descompone en dos partículas, (hacia afuera) y (agujero negro). La partícula (agujero negro) cae a través del horizonte, pero la partícula (hacia afuera) escapa al infinito. Es posible organizar la desintegración de modo que la partícula que escapa (hacia afuera) transporte más energía hacia el infinito que la partícula (hacia adentro), extrayendo así energía del agujero negro.] Véase en: Hartle, J. (2014) “Gravity: An introduction to Einstein’s General Relativity”. 1st edition. Pearson New International Edition. Chapter 15: Rotating black holes. pp. 323.

⁵⁶Es importante mencionar que, las singularidades pueden clasificarse de acuerdo con su tipo. Entre ellas se encuentran las singulares temporales, espaciales, desnudas.

⁵⁷La hipótesis de Penrose sobre censura cósmica emerge de la siguiente pregunta “(...) does there exist a “cosmic censor” who forbids the appearance of naked singularities, clothing each one in an absolute event horizon? In one sense, a “cosmic censor” can be shown not to exist.” [¿Existe un “censor cósmico” que prohíba la aparición de singularidades desnudas, revistiendo cada una de ellas de un horizonte de sucesos absoluto? En cierto sentido, se puede demostrar que no existe un “censor cósmico”] Véase en: Penrose, R. (1969) “Gravitational collapse: The role of general relativity”. Recuperado de: http://old.phys.huji.ac.il/~barak_kol/Courses/Black-holes/reading-papers/PenroseSing2.pdf

ble inferir su presencia en el universo. Tanto así que, “(...) astronomers have discovered many objects that show the telltale signs of an unseen gravitational influence with a large enough mass to suggest a black hole.” [los astrónomos han descubierto muchos objetos que muestran signos reveladores de una influencia gravitatoria invariable con una masa lo suficientemente grande como para sugerir que se trata de un agujero negro] (Bennett, J. et al, 2018, pp. 375). Estos hallazgos derivan de los avances teóricos y tecnológicos, los cuales hacen que a través de fenómenos tales como las ondas gravitacionales y los lentes gravitacionales estos objetos sean capaces de detectar. Esto, sin contar con las fotografías de agujeros negros que se han presentado durante la última década.

Lentes gravitacionales: Su descubrimiento fue en el año 1979 por parte de los astrónomos Dennis Walsh, Robert Carswell y Ray Weymann, a través del estudio de un “cuásar doble” denominado Q0957+561. La particularidad de su trabajo consistió en la detección de dos imágenes de cuásar (Véase en: Figura 3.8) que se observaron separadas 0,57 segundos de arco, aunque con corrimientos al rojo y espectros similares⁵⁸.



Figura 3.8: Imagen del cuásar doble. Tomado de: <https://www.galactic-hunter.com/post/twin-quasar>

A partir de ello, los científicos dedujeron que la posibilidad de esta desviación era por las diversas trayectorias que tomaba la luz a través de objetos de gran tamaño, con campos gravitacionales importantes; lo cual es un resultado de la teoría de la relatividad general frente a la deflexión de la luz.

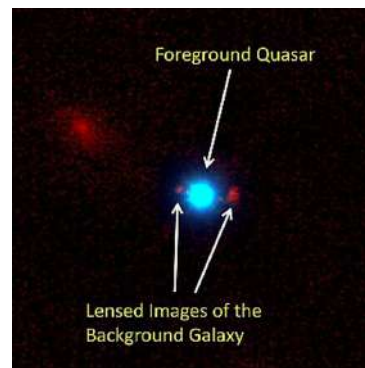
Por esta razón, afirman Bartelmann, M y Schneider, P (2000) “(...) the field of gravitational lensing developed into one of the most active subjects of astrophysical research. Several dozens of multiply imaged sources have since been found.” [el campo de las lentes gravitacionales se ha convertido en uno de los temas más activos de la investigación

⁵⁸Walsh, D; Carswell, R y Weymann, R. (1979). “0957+561 A, B: Twin quasi-stellar objects or gravitational lens?” Nature. 279. (pp. 381-384) Recuperado de: <https://www.nature.com/articles/279381a0>

astrofísica. Desde entonces, se han encontrado varias docenas de fuentes con múltiples imágenes] (p. 05). De ahí que, su aplicación ha permitido estudiar la masa alrededor de galaxias, cúmulos de materia, planetas, entre otros. También, posibilita ser un medio por el cual se infiere la presencia de agujeros negros.

De acuerdo con la teoría general de la relatividad, la atracción gravitatoria de la masa desvía la luz, por ello, puede viajar por múltiples caminos hasta llegar a un receptor. Una lente gravitacional se puede formar cuando entre la fuente y el observador hay presencia de algún objeto con gran masa, como una galaxia, estrellas de neutrones o agujero negro. Un ejemplo claro, es la lente gravitacional descubierta en el año 2010 del cuásar⁵⁹ SDSS J0013+1523 (blue) la cual se observa en la figura 3.9.

El cuásar se encuentra ubicado en medio de la tierra y la galaxia. La luz proveniente de ella es desviada por el intenso campo gravitatorio producido por el agujero negro supermasivo que se encuentra al interior del cuásar. Por esta razón, los rayos luminosos que llegan a la tierra, se encuentran “alrede-



dor” de éste haciendo que se vea en la parte superior e inferior de la imagen obtenida, lo cual se observa en la siguiente imagen (Véase en: Figura 3.10).

Figura 3.9: Cuásar (azul) lente de una galaxia (roja). Captado por el telescopio Keck II Tomado de: <http://www.astro.caltech.edu/~george/qsolens/>

⁵⁹Los cuásares se conocen como objetos que iluminan extraordinariamente en el universo, se dice que están alimentados por agujeros negros supermasivos las cuales se ubican en los núcleos activos de galaxias.

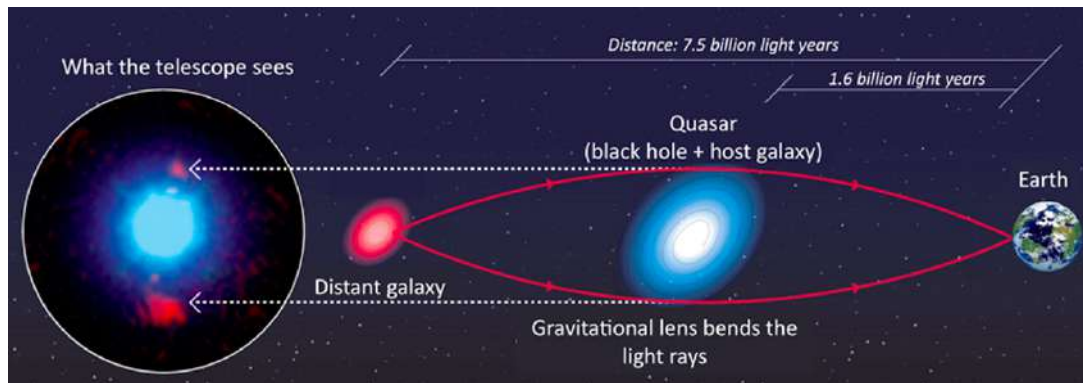


Figura 3.10: Explicación de la lente gravitacional descubierta en el año 2010. Tomado de: <https://sites.astro.caltech.edu/~george/qsolens/>

Ondas gravitacionales: La predicción de su existencia fue propuesta en 1918 por A. Einstein, a través del estudio de dos cuerpos (planetas o estrellas) que orbitan entre sí⁶⁰. Inicialmente, la analogía realizada por el físico alemán fue preguntándose “(...) si una masa en movimiento acelerado podía radiar ondas de gravitación, de la misma forma que una carga eléctrica en movimiento acelerado radia ondas electromagnéticas” (Luminet, 1994, p. 321). Las soluciones a sus ecuaciones permitieron demostrar que, los objetos masivos acelerados pueden perturbar el espacio-tiempo de manera que, generan una perturbación que se propaga en todas las direcciones con la misma velocidad que la de la luz.

Las primeras pruebas indirectas de las ondas gravitacionales fueron alrededor del año 1974, a partir del descubrimiento del primer púlsar binario por parte de Russell A. Hulse y Joseph H. Taylor⁶¹. Según ambos científicos,

The radiation emitted by the binary pulsar is too weak to be observed on the earth with existing techniques. However, perhaps the violent perturbations of matter that take place when the two astronomical bodies in a binary

⁶⁰Einstein, A. (1918) “Über gravitationwellen” Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften (pp. 154 - 167). Recuperado de: <https://echo.mpiwg-berlin.mpg.de/ECHOdocuView?url=/permanent/echo/einstein/sitzungsberichte/W7ZU8V1E/index.meta>

⁶¹La Real Academia Sueca de las ciencias, condecoró a Hulse y Taylor con el nobel de física de 1993 por sus trabajos acerca de la gravitación en relación con el primer púlsar binario descubierto en 1974: “for the discovery of the new type of pulsar, a Discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation”: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1993/summary/>

star (or a binary pulsar) approach each other so closely that they fall into each other may give rise to gravitational waves that could be observed here. It is also hoped to be able to observe many other violent events in the universe. [La radiación emitida por el pulsar binario es demasiado débil para ser observada en la Tierra con las técnicas existentes. Sin embargo, tal vez las violentas perturbaciones de la materia que tienen lugar cuando los dos cuerpos astronómicos de una estrella binaria (o un púlsar binario) se aproximan tanto que caen el uno en el otro puedan dar lugar a ondas gravitacionales que podrían observarse aquí. También se espera poder observar muchos otros sucesos violentos en el universo.] (Hulse, R y Taylor, J, 1993)

La importancia de estudiar las ondas gravitacionales, reviste en que permiten explorar fenómenos astrofísicos tales como explosiones de supernovas, sistemas binarios estelares, formación de agujeros negros e incluso el big bang. Por esta razón, la necesidad de crear un instrumento que permitiera detectarlos hizo posible crear el proyecto LIGO (Laser interferometry gravitational-waves observatory) en 1984 de la mano de Kip Thorne y Rainer Weiss. No obstante, su construcción inició hasta el año 1994 y finalizó en 1999, iniciando así sus primeras operaciones en el periodo entre el 2002 y 2010, sin realizar ningún tipo de hallazgo⁶². Por este motivo, fue necesario realizar una actualización a través de una ingeniería mucho más sofisticada que le permitiera tener una mayor sensibilidad (Will, C 2018). De ahí que, reanudó sus ope-

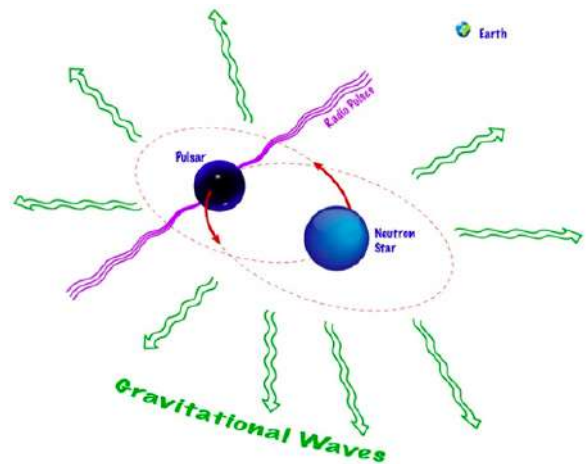


Figura 3.11: Diagrama del sistema binario Hulse/Taylor. Tomado de: <https://asd.gsfc.nasa.gov/blueshift/index.php/2016/03/17/we-knew-that-already/>

⁶²Es importante mencionar que, este instrumento para el hallazgo de ondas gravitacionales consta de tres interferómetros, dos de ellos se encuentran en Hanford – Washington (Noreste de los Estados Unidos) y el restante el Livingston – Louisiana (Sureste de los Estados Unidos).

raciones en febrero del año 2015, en el cual meses más tarde se captaron las primeras señales de ondas gravitacionales.

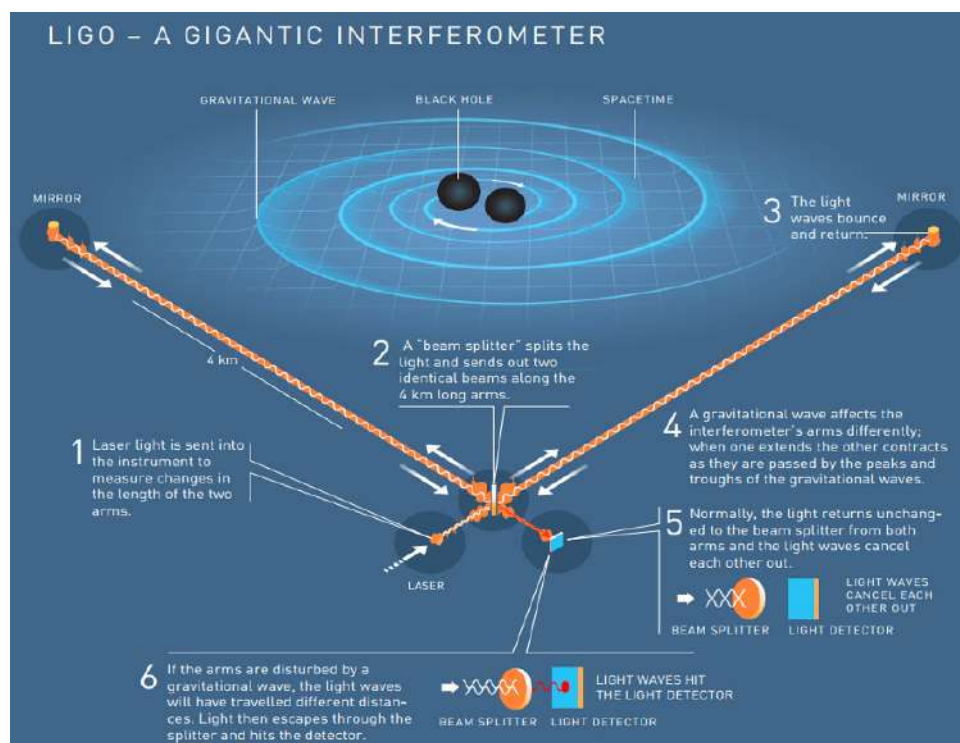


Figura 3.12: Ilustración del funcionamiento de los interferómetros LIGO. Tomado de: <https://phys.org/news/2019-05-ligo-virgo-neutron-star-smash-ups.html>

Específicamente el 14 de septiembre del año 2015 los interferómetros de Louisiana y Hanford captaron por primera vez una señal muy clara de estas ondulaciones espaciotemporales. El hallazgo de ellas, permitió confirmar la predicción de la teoría general de la relatividad de Einstein casi un siglo después⁶³. Adicionalmente, los científicos llegaron a la conclusión que estas ondas gravitacionales detectadas fueron producidas por la fusión de dos agujeros negros (Véase en: Figura 3.12).

Fotografías de agujeros negros: Durante la última década, los avances alrededor de la detección de agujeros negros ha progresado de manera significativa. En el año 2009 se inició el proyecto internacional Event horizon telescope (EHT), el cual consiste en un

⁶³La Real Academia Sueca de las ciencias, condecoró a Rainer Weiss, Barry Barish y Kip Thorne con el nobel de física del 2017 por sus trabajos acerca de la detección de ondas gravitacionales: “for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves”: <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/press-40.pdf>

trabajo colaborativo de radio telescopios alrededor del mundo que tiene como objetivo observar cuerpos de gran tamaño en el universo, así como el horizonte de eventos de un agujero negro supermasivo. Estos radiotelescopios son: ALMA (Atacama Large Millimeter / Submillimeter Array) Chajnantor Plateau, Chile; APEX (Atacama Pathfinder EXperiment) Chajnantor Plateau, Chile; 30-M (IRAM 30-M Telescope) Pico Veleta, España; JCMT (James Clerk Maxwell Telescope) Maunakea, Hawái; LMT (Large Millimeter Telescope) Sierra negra, México; SMA (Submillimeter Array) Maunakea, Hawái; SMT (Submillimeter Telescope) Mount Graham, Arizona y SPT (South Pole Telescope) Estación del Polo sur.

Los primeros resultados de este telescopio fueron expuestas en ruedas de prensa realizadas el 10 de abril de 2019, donde se anunció la primera imagen de un agujero negro supermasivo (M87*) localizado en la galaxia Messier 87⁶⁴ (Véase en: Figura 3.13).

De acuerdo con EHT collaboration,

Overall, the observed image is consistent with expectations for the shadow of a Kerr black hole as predicted by general relativity. The asymmetry in brightness in the ring can be explained in terms of relativistic beaming of the emission from a plasma rotating close to the speed of light around a black hole. [En conjunto, la imagen observada es coherente con las expectativas para la sombra de un agujero negro de Kerr tal y como predice la relatividad general. La asimetría en el brillo del anillo puede explicarse en

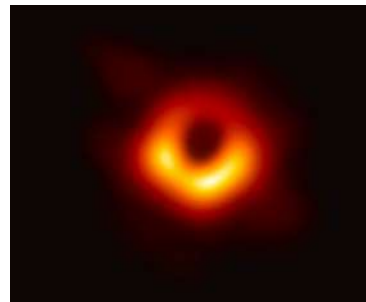


Figura 3.13: Imagen de M87* por event horizon telescope. Tomado de: <https://www.eso.org/public/images/eso1907a/>

⁶⁴The event horizon telescope collaboration (2019). “First M87 event horizon telescope results. I. The shadow of the supermassive black hole”. The astrophysical journal letters. 875. Recuperado de: <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ab0ec7/pdf>

términos de emisión relativista de un plasma que gira cerca de la velocidad de la luz alrededor de un agujero negro.] (p. 01)

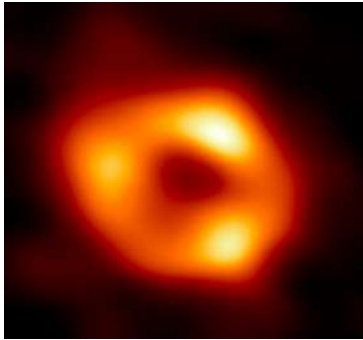


Figura 3.14: Imagen de Sagitario A* por event horizon telescope. Tomado de: <https://www.eso.org/public/images/eso2208-eh-t-mwa/>

bilidad de esta imagen fue gracias al trabajo en conjunto de astrofísicos, matemáticos, ingenieros, físicos; quienes a través de la creación de un algoritmo (CHIRP: Continuous high-resolution image reconstruction using patch priors) orientado por Katherine Bouman llegaron a captar y tratar todas las señales para obtener así la primera imagen reconstruida de un agujero negro.

A partir de lo anterior es relevante resaltar que, la temática de agujeros negros toma relevancia en la medida que los hallazgos que se han realizado en la actualidad, se han expuesto a la sociedad mediante la divulgación científica. Las preguntas emergentes alrededor de estas regiones surgen en la escuela, ya que ellas captan el interés de los estudiantes quienes tienen acceso a esta información.

Por esta razón, se establece un criterio epistemológico y teórico la investigación alrededor de la astrofísica de agujeros negros, ya que posibilita una mirada más precisa respecto

⁶⁵La Real Academia Sueca de las ciencias, condecoró a Roger Penrose, Reinhard Genzel y Andrea Ghez con el nobel de física del 2020 por sus trabajos alrededor de la relatividad general y los agujeros negros supermasivos “for the discovery that black hole formation is a robust prediction of the general theory of relativity” and “for the discovery of a supermassive compact object at the centre of our galaxy”: <https://www.nobelprize.org/uploads/2020/10/press-physicsprize2020.pdf>

a su formación, características y estructura, las cuales se consideran significativas para reconocer los procesos físicos que las caracterizan. Así mismo, Los avances respecto a su detección abre perspectivas frente a la investigación del universo y las dinámicas que yacen en su inmensidad. Junto con ello, resulta significativo resaltar que los estudios históricos epistemológicos sobre la gravitación y la luz, se sitúan como ejes articuladores primordiales en la medida que estas bases teóricas y disciplinares consolidan los fundamentos necesarios para la elaboración del diseño de la propuesta de aula.

Capítulo 4

Aspectos pedagógicos y didácticos

En este capítulo, se realiza una descripción de las consideraciones pedagógicas y didácticas que se contemplan relevantes para la elaboración y desarrollo de una propuesta orientada a la enseñanza de la astrofísica en la escuela, particularmente, de los agujeros negros. Para ello, en primer lugar, se resaltan algunas reflexiones relativas a la enseñanza y el aprendizaje de la astronomía. Así mismo, se mencionan algunos estudios que se han realizado de la didáctica de este campo de conocimiento. Luego, se realiza un análisis crítico sobre la enseñanza de las ciencias naturales, reconociendo la importancia de las relaciones que se tejen en la escuela entre lenguaje, experiencia y conocimiento. Posteriormente, se presenta el diseño de la propuesta de aula -junto con sus fases y momentos- donde inicialmente se describen los criterios pedagógicos y didácticos que emergen del estudio histórico, epistemológico y teórico realizado en los capítulos anteriores respecto a los agujeros negros. Finalmente, se exponen algunos hallazgos de la puesta en marcha de las actividades, así como sus alcances y proyecciones.

4.1. Perspectivas sobre la enseñanza de la astronomía

“Se ha dicho que la astronomía es una experiencia de humildad y construcción de carácter. Quizá no hay mejor demostración de la tontería de los prejuicios humanos que esta imagen distante de nuestro minúsculo mundo. Para mí, subraya nuestra responsabilidad de tratarnos los unos a los otros más amablemente,

y de preservar el pálido punto azul, el único hogar que jamás hemos conocido.”

Carl Sagan.

Uno de los campos de investigación que ha cobrado mayor relevancia en los estudios relacionados con las ciencias exactas, es la astronomía. El avance tecnológico en las últimas décadas ha permitido posicionarla como una de las áreas más importantes en la actualidad, gracias a los diversos hallazgos que han confirmado algunas predicciones planteadas en el siglo XX entre las que se encuentran la existencia de ondas gravitacionales, exoplanetas, agujeros negros supermasivos, etcétera. Lo anterior, no ha sido ajeno al conocimiento de los estudiantes en algunos niveles de educación (en especial básica, media y superior) quienes encuentran en esta especialidad un gran atractivo e interés particular por su aprendizaje¹. Por esta razón, la necesidad de potenciar su enseñanza estriba en su aporte a esa búsqueda incesante del hombre por conocer y comprender su origen; además, por ser “(...) una de las disciplinas más importantes para comprender cómo los seres humanos nos relacionamos con el universo” (Camino, 2018, p.193).

Sin embargo, las dificultades en cuanto a su enseñanza han sido pieza de discusión dentro del contexto de la educación en ciencias naturales no solo en latinoamérica, sino a nivel mundial. Pues tal como afirma John Percy, profesor emérito de la Universidad de Toronto “(...) if astronomy is so interesting and important, and available in so many settings, why is not taught in more schools?” [Si la astronomía es tan interesante e importante, y está disponible en tantos entornos ¿Por qué no se enseña en más escuelas?] (Percy, 1998, p. 03). Las respuestas frente a ello oscilan entre las problemáticas que se evidencian en cuanto a la escasa financiación de los gobiernos en ciencia y tecnología, las políticas públicas de educación (currículos) y la poca formación de docentes especializados en este campo, lo cual es el resultado de los factores anteriormente enunciados (Véase en: Capítulo I). No obstante, es clave mencionar que la necesidad por potenciarla va más allá de incorporarla como una asignatura obligatoria en los planes de estudio. Implica reconocer el alcance del conocimiento humano por comprender los fenómenos que yacen en el cosmos, lo que además permite reflexionar sobre nuestra posición en la Tierra en

¹Esto se menciona con base en la experiencia como estudiante y docente de física, tal como se mencionó en el capítulo 1: Contexto origen.

cuanto al enigma del devenir del universo y la vida.

A partir de lo anterior, se considera relevante mencionar que “(...) la astronomía es una de las disciplinas con mayor poder para la integración de los conocimientos que se van adquiriendo durante el proceso de aprendizaje” (Gangui, Iglesias, et al. 2007, p. 03), ya que con ella es posible abarcar temáticas propias de las ciencias naturales y también de las ciencias humanas². De esta manera, el trabajo realizado por el Doctor en ciencias de la educación Néstor Camino³, permite tomar una postura crítica frente a la concepción fragmentada de este campo de estudio, así como el de la educación. Para Camino (2018)

Tal múltiple fragmentación dificulta comprender cómo son los procesos de construcción de conocimiento, y en especial desvirtúa fuertemente de qué se trata la astronomía y cómo se trabaja en este campo tan rico, el cual queda siempre incompleto si no se lo ve como un todo integrado.

La proyección de muchos siglos hacia el pasado ubica a la astronomía como una de las disciplinas más importantes para comprender cómo los seres humanos nos relacionamos con el universo. Recorrer la evolución de las ideas sobre el universo es una herramienta epistemológica de primer nivel, porque nos muestra de qué manera a través de la historia, mucho antes de que las ciencias clásicas estuvieran delineadas, la discusión de ideas y la generación de modelos fueron variando a través del tiempo, y muestra también cómo la interacción social puede modificar a veces las estructuras que se construyen desde la lógica disciplinar. (p. 193)

²Es clave reconocer que la astronomía es una de las disciplinas más antiguas que existen. Gracias al avance en el conocimiento humano es posible abordarla a través de conceptos particulares de la matemática, física, biología, química, geología, etc. No obstante, también a través de la historia, la geografía, las artes, la sociología e incluso de la teología. De ahí que sea un campo de conocimiento tan versátil, en el cual pueden acceder personas no expertas.

³El Dr. Néstor Eduardo Camino es Licenciado en astronomía, Profesor en físico matemáticas y Doctor en ciencias de la educación de la Universidad Nacional de la Plata (Argentina). Es investigador y docente de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. Su investigación está orientada a las visiones de mundo y propuestas innovadoras para la didáctica de la astronomía.

Por tal motivo, en la enseñanza de la astronomía la idea de una ciencia que emerge de la cultura, que se construye en colectivo y que se transforma, toma mayor trascendencia. De hecho, permite recabar en los diversos obstáculos que limitan nuestra labor docente y que hace que sea necesario apostar por alternativas en las cuales se desarticulen las construcciones epistemológicas del saber científico como único, absoluto y dominante. En ese sentido, se abren nuevas perspectivas de análisis que permiten reconocer la importancia de los ejercicios de pensamiento, discusiones, debates e intereses de por medio, que propiciaron el desarrollo de este campo de conocimiento. Adicionalmente, una concepción íntegra de ella conlleva a no reducir lo esencial de los razonamientos que se desprenden de la complejidad de los fenómenos que se estudian⁴. Por el contrario, la posiciona en un panorama de constante evolución y crecimiento que posibilita a las ciencias conversar con las dinámicas sociales y así desarrollar una mirada contextualizada del surgimiento e impacto que ha tenido la astronomía en la historia de la humanidad, que favorece además a la formación y construcción del pensamiento crítico de maestros y estudiantes.

La premisa de que la astronomía es una actividad cultural, posibilita que sea posible enseñarla a través de la construcción de explicaciones que relacionan las cosmovisiones de los sujetos y que va más allá de la observación por el telescopio (Camino, Nardi, Pedreiros, et al, 2016). De ahí que la necesidad de integrarla a la educación tanto formal como informal, implica un gran trabajo por parte de los docentes que la estudian; ya que la elaboración de propuestas orientadas a su enseñanza, deben estar acordes con el contexto a trabajar. Esto enmarca un gran desafío en cuanto al análisis y creación de metodologías que permitan “(...) mantener un delicado equilibrio entre la rigurosidad conceptual y metodológica propias de la disciplina científica, con los tiempos, intereses, necesidades y modalidades de las personas con quienes compartiremos tales acciones” (Camino, 2018). Por esta razón, el reto para los maestros radica en la didáctica bajo la cual se elaboran estas estrategias, ya que no debe considerarse un ejercicio de simplificación de conceptos⁵.

⁴La implicación de concebir la ciencia como inmediata y fácil limitaría la construcción de conocimiento. Por lo tanto, una educación que no incentive los ejercicios de pensamiento reduciría su formación a una sociedad carente de criticidad y análisis, que se encarga de repetir información carente de sentido.

⁵Bajo la perspectiva de Bachelard, una educación dada a la simplificación de conocimiento acabaría por simplificar la enseñanza e incentivar la inmediatez como la vía más fácil para aprender. Por ello, plantea que “simplificar es sacrificar”, lo cual tiene una repercusión directa para el estudiante, ya que

Por el contrario, se trata de una tarea detallada, pensada y cuidadosa que contribuya a ejercicios de pensamiento que proporcione transformar y construir aprendizajes significativos.

Finalmente, una de las ideas más significativas de concebir la astronomía de forma integral, es que su enseñanza proporciona el espacio para preguntarnos “(. . .) sobre nosotros mismos: para adentro en el planeta Tierra y para adentro de nosotros, como personas y como humanidad” (Camino, 2018, p. 194). De ahí que, además de incorporar los elementos conceptuales de las ciencias exactas y sociales, contribuye a la formación de una sociedad que reconoce y acepta las particularidades de los sujetos, las diversas formas de aproximarse al conocimiento y las múltiples maneras de apreciar la realidad. Por ello, lo profundo e incluso trascendental de esta disciplina, es que nos une en tiempos con los seres humanos que alguna vez se han preguntado por su existencia y lugar en el universo; y su enseñanza permite también fomentar algunos valores entre los que se contemplan la tolerancia, la solidaridad, el respeto, la paz y la humildad, los cuales deben prevalecer entre individuos que coexisten con otras vidas en la Tierra (Camino, 2018).

4.2. Didáctica de la astronomía: Un campo en construcción

“Hacer didáctica no es “simplificar las cosas”, sino transformarlas para que todos comprendan lo profundo de los conceptos involucrados y no sus aspectos más “triviales”.

Néstor Camino, 2018

La aproximación de la astronomía en la escuela frecuentemente se orienta a la enseñanza de las ciencias naturales, particularmente de la física. Los modelos teóricos que se abordan desde este campo de conocimiento, permiten explicar algunos fenómenos as-

reduce y limita sus ejercicios de pensamiento; esto, sin mencionar que decapita en gran medida su imaginación. Véase en: Georges, Jean. (2000). Bachelard, “La infancia y la pedagogía.” Capítulo II: Por una pedagogía del NO. Fondo de cultura económica Ltda. Bogotá.

tronómicos⁶. No obstante, muchas de las temáticas que se relacionan con ella no se tratan en clase, lo cual es una problemática que emerge de diversos factores (políticos, ministeriales, institucionales, entre otros)⁷. Por esta razón, la necesidad de crear espacios que incentiven abordar la astronomía e incluso la astrofísica en lugares formales e informales, exige a los docentes, la elaboración de una serie de herramientas que sean pensadas, rigurosas, creativas y pertinentes; las cuales estén “(...) diseñadas para nuevos tiempos, diferentes estudiantes, contextos socioculturales dinámicos, intereses variados, categorías teóricas recién surgidas y recursos modernos” (Camino, 2021).

En ese sentido, es clave mencionar que la didáctica de la astronomía parece ser un campo que se encuentra en construcción y constante evolución, la cual afirma Camino, es joven comparada con la de las ciencias naturales. Las diversas estrategias que se han implementado a través de los trabajos investigativos en algunas universidades han generado la creación de diversas estrategias para su aprendizaje. Por lo cual se evidencia que la riqueza que tiene esta disciplina hace que “(...) pueda ser un campo fértil para generar innovaciones educativas concretas (...) todas ellas destinadas a profundizar y mejorar cómo vamos relacionándonos con el universo del que somos parte, en particular desde nuestro lugar latinoamericano (...)” (Camino, 2011, p. 2).

La mirada integral de la astronomía, de acuerdo con el trabajo realizado por Camino, hace que su didáctica y práctica sean movilizadoras en el sentido que se constituye como una “disciplina de fusión”. Esta incorpora los métodos propios del conocimiento científico y sus características epistemológicas con la educación en cuanto a los procesos que facilitan el desarrollo de habilidades para llegar a aprendizajes significativos.

⁶Un ejemplo puede ser la ley de gravitación universal, que permite explicar fenómenos relacionados con el movimiento planetario, la órbita de cuerpos celestes, entre otros.

⁷Las problemáticas que se identifican en relación con la enseñanza de la astronomía, fue expuesto en el capítulo I: Contexto origen del presente trabajo.

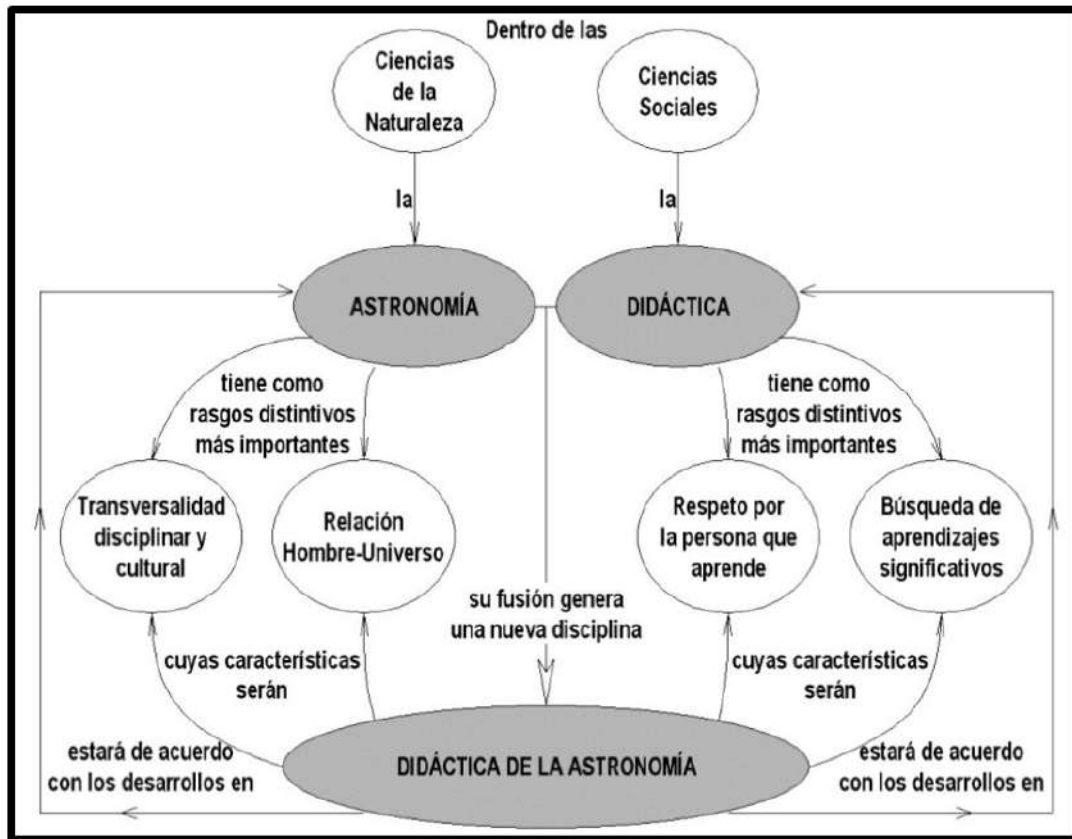


Figura 4.1: Esquema de síntesis sobre las características de la didáctica de la Astronomía. Tomado de: http://snea2011.vitis.uspnet.usp.br/sites/default/files/SNEA2011_Palestra_Camino.pdf

El esquema anterior, aterriza la idea que propone Camino en cuanto a las características de la didáctica de la astronomía, ya que se orientan tanto en las ciencias naturales como en las ciencias sociales. Por un lado, es indispensable reconocer los cambios en materia del avance científico que se han generado en la sociedad durante las últimas décadas, ya que con ellas emergen nuevas necesidades en el campo educativo las cuales implican transformaciones (e innovaciones) en la enseñanza. En consecuencia, la mirada crítica frente a las prácticas educativas convencionales y la urgencia en realizar propuestas diversas, refleja la importancia de una educación contextualizada que no solo identifique sino comprenda las condiciones generales (sociales, políticas, económicas, culturales, entre otras) que entran en juego en el aula dentro los procesos de construcción y desarrollo del aprendizaje. Más aún, requiere del compromiso de los docentes para quienes es fundamental enseñar a sus estudiantes a “(...) cuestionar críticamente las instituciones, las

políticas y los valores que dan forma a sus vidas, las relaciones con los demás y una infinidad de vínculos con el mundo general” (Giroux, 2013, p. 17); lo cual permite ubicarlos en actores y sujetos activos de su proceso cognoscitivo.

Una de las apuestas que cobra mayor relevancia dentro de la enseñanza de la astronomía, es la necesidad de convertirse en algo vivencial para que los estudiantes puedan interactuar con el cielo, realizar observaciones, registros, entre otras; lo que es significativo para ciertos tópicos que involucran esencialmente la observación, en concreto las constelaciones, los eclipses, el día y la noche. Sin embargo, ¿qué ocurre con las temáticas que van más allá del estudio del firmamento? ¿Tendría lugar entonces enseñar fenómenos que no son posibles experimentar directamente como lo son las galaxias activas, los planetas extrasolares e incluso los agujeros negros? El panorama actual de la astrofísica, por ejemplo, permite comprender que la didáctica de la astronomía no debe ser estática, por el contrario, exige de un proceso creativo y dinámico que se encuentra en diálogo permanente con la investigación educativa (Camino, 2011). Por esta razón, las posibilidades emergentes frente a una propuesta que se orienta al acercamiento de la física de los agujeros negros, “(...) obliga a repensar alternativas didácticas para que las mismas adquieran importancia significativa en los procesos de enseñanza-aprendizaje” (Navone, Aquilano, et al, 2009, p. 58).

Ahora bien, teniendo presente que “(...) toda acción educativa sobre enseñanza de la astronomía debería ser diseñada tomando en cuenta aquellas características con rigurosidad conceptual, tanto desde lo astronómico como desde lo pedagógico y didáctico, respetando en especial los tiempos, intereses y capacidades de quienes aprenden” (Camino, 2011); se hace necesario realizar un trabajo teórico sólido en cuanto al componente disciplinar. Lo anterior, con el fin de establecer los criterios históricos, epistemológicos y teóricos que recojan los elementos claves para la elaboración del diseño de instrumentos que permitan vivenciar algunos aspectos distintivos -como la densidad, masa y volumen, la gravitación y la trayectoria de la luz- que contribuyan a la resignificación -en este caso-, del concepto de agujero negro⁸.

⁸Se habla de resignificación, ya que se cree necesario evitar caer en la repetición de información que para muchas personas carece de sentido. Por ejemplo, es común que al hablar de agujeros negros,

4.3. Por una apuesta crítica a la enseñanza de las ciencias

*“Los seres humanos acontecemos en el lenguaje,
Y acontecemos en el lenguaje
como el tipo de sistemas vivientes que somos”
Humberto Maturana*

Las reflexiones anteriores alrededor de la educación en ciencias naturales conllevan a la necesidad de replantear la perspectiva de la enseñanza de este campo de estudio en la escuela. Especialmente, por el hecho que “(...) “aprender” se ha convertido en una especie de valija en la vida cotidiana” (Giordan, A, 2020, p. 22) y el conocimiento aquello que “llena” su interior. Esta mirada que se relaciona con la idea de “transmisión frontal de conocimientos”⁹ se caracteriza por concebir una relación lineal entre el docente (depositario de un saber) y el estudiante (almacenador de saberes). Las dificultades que emergen de ello, es la anulación del ser humano que aprende, ya que se le concibe como un recipiente vacío, dicho en otro modo “tabula rasa”.

En este planteamiento que también se relaciona con la perspectiva de la educación bancaria de Freire, el educador tiene “(...) la tarea indeclinable de “llenar” a los educandos con los contenidos de su narración¹⁰” (Freire, 2005). Este sentido de la educación, que se centra en la narración de saber, hace que los contenidos sean desarticulados con las realidades que viven los estudiantes y que las palabras carezcan de sentido al momento de hacer de ellas más sonido que significado. Lo anterior, configura un panorama educativo

algunos mencionen que “son cuerpos con tanta masa que la luz no escapa”. No obstante, ¿es claro qué hace posible que la luz no escape? ¿Por qué contienen tanta masa? ¿De qué cantidad de masa se está hablando? Por ende, se cree necesario construir un nuevo significado que sea trascendente y permita reconocer los aspectos teóricos que hay detrás de estas afirmaciones.

⁹Idea propuesta por Giordan y Vecchi en su texto: Marco teórico: dimensiones conceptuales de la idea de “concepción personal”. Capítulo I. Tomado de: Giordan, A. y Vecchi, Gérard de. (1995) Los Orígenes del saber, Fundamentos N° 1, Colección Investigación y Enseñanza. Diada Editorial S. L. Sevilla.

¹⁰De acuerdo con Freire las relaciones de poder entre educador y educandos presentan un carácter que se fundamenta en la narrativa y el discurso. En este tipo de educación, el objetivo se centra en narrar y tener un sujeto que lo hace y otros pacientes que lo oyen (los educandos).

entre aquellos “acreedores del saber” contra los que no saben¹¹, haciendo del papel del docente un agente promotor de la ignorancia que cosifica el ser del sujeto que aprende y que forma para una “cultura del silencio”¹² (Véase en: Figura 4.2)



Figura 4.2: Esquema del modelo de educación bancaria de Freire. Elaboración propia

La perspectiva de una enseñanza basada en la «transferencia» trae consigo “(...) una falsa comprensión de los hombres a los que reduce a meros objetos” (Freire, 2005, p. 89). De ahí que el conocimiento quede reducido a la repetición de información, a la reproducción de técnicas que se vuelven mecánicas y que da lugar a una dicotomía entre

¹¹En ese sentido, es clave mencionar que la propuesta de Freire se centra en forjar una educación para la liberación, que implica la emancipación de la “(...) dominación, la negación del hombre abstracto aislado, suelto y desligado del mundo (...)” (Freire, 2005, p.94). Más aún, refiere a la necesidad de una práctica docente crítica que “(...) implícita en el pensar acertadamente, encierra el movimiento dinámico, dialéctico, entre el hacer y el pensar sobre el hacer.” (Freire, 1996, p. 33)

¹²Transgredir la cultura del silencio permite a los “oprimidos” liberarse, apropiarse de un discurso crítico de sobre el mundo. Genera el desarrollo de un lenguaje alrededor del análisis de su realidad. Véase en: Freire, P. (1992) “Pedagogía de la esperanza: Un reencuentro con la pedagogía del oprimido”. Capítulo I.

hombre-mundo¹³. Más aún, sugiere la creación de “(...) estructuras educativas que adormezcan la capacidad crítica de los alumnos (...)” (Chomsky, 2001, p.11) y que incentiva entonces a la formación de sociedades autómatas¹⁴. Por esta razón la necesidad de configurar las prácticas educativas “(...) se fundamenta en el supuesto de que el aprendizaje no implica el procesar el conocimiento recibido sino transformarlo (...)” (Giroux, H, 2013, p. 17); lo cual requiere de una reflexión crítica sobre la práctica docente que incite a su transformación, en tanto se reconozca a sí mismo como intelectual e investigador¹⁵.

Bajo estas consideraciones, es clave reconocer que pensar el papel del maestro como intelectual de la educación, le permite también cuestionar su subjetividad y su propio quehacer frente a las imposiciones de las políticas públicas educativas que obstaculizan su praxis. Así mismo, propicia el espacio adecuado para la configuración de una educación que no esté orientada a encaminar a los estudiantes en prácticas irreflexivas de procedimientos y técnicas, que devalúan la dimensión intelectual de la enseñanza (Chomsky, 2001). Por el contrario, busca formar un maestro “(...) capaz de construir sus propias opciones y visiones hacia su quehacer educativo” (Díaz Barriga, A 1993, como se citó en Díaz-Barriga y Hernández, 2002); es decir, que sean considerados intelectuales transformativos, que combinen la reflexión con la acción (Giroux, 1997). Todo ello, podrá fomentar una educación de carácter crítico donde los educadores (agentes activos de los procesos), contribuyan a la formación de una conciencia social y política que cree las

¹³Las brechas que se abren entre el hombre y el mundo son realmente inexistentes. No es posible despojar al hombre de su condición de ser social que se encuentra coexistiendo con el mundo y con los otros.

¹⁴En este panorama, cabe realizar una analogía con la película “The Wall” de Pink Floyd (1989), donde la escuela queda reducida a un régimen dictatorial que pretende homogenizar, disciplinar y mantener el “control” de los estudiantes, decapitando así sus potencialidades, capacidades de creación y habilidades. De ahí que resuene y cobre aún más sentido su canción “another brick in the wall” [Otro ladrillo en el muro]: “we don’t want no education, we don’t want no thought control” [No queremos educación, no queremos control de pensamiento] (Chomsky, 2001).

¹⁵De acuerdo con Giroux, el maestro como intelectual, debe potenciar las habilidades y conocimientos de los estudiantes para luchar contra las injusticias y convertirse así en agentes críticos dados a un mundo libre de opresiones y explotación. Por su parte Freire, afirma que, “no hay enseñanza sin investigación ni investigación sin enseñanza”, cada uno de ellos se relaciona en la medida que mientras se enseña, se busca, se indaga, se conoce, se interviene.

condiciones para conocer la realidad e intentar transformarla.

Por otro lado, una de las ideas que pueden resaltarse en cuanto a la configuración de la educación, es la investigación cualitativa¹⁶, la cual enmarca un panorama clave para la transformación de las realidades sociales y escolares. Esta perspectiva, desarticula la concepción de una educación dogmática basada en la transmisión de información, donde se forman individuos sin conciencia con el mundo que los rodea y que fomenta el desarrollo de una sociedad cosificada. Por el contrario, propicia la comprensión de un entramado de conductas, actitudes, situaciones, significados, procesos, patrones, formas de vida, grupos sociales, entre otros; que configuran los escenarios donde se desarrolla el ejercicio docente. La investigación educativa incentiva la comprensión de las realidades educativas más que interpretarlas, desde perspectivas claras y flexibles que resignifiquen el papel del estudiante y del educador dentro de los procesos de aprendizaje.

Una educación que permita al maestro ser intelectual e investigador, rescata la identidad de las personas involucradas y las interrelaciones que establecen con los otros, así como la incidencia de las diferentes esferas sociales que “impactan” la sociedad. Además, reconoce la importancia de una enseñanza contextualizada, que responda a las necesidades de los estudiantes a partir de las diversas formas de conocer, de tejer experiencias y configurar subjetividades. En resumen, es importante concebir el escenario educativo como un sistema de interrelaciones complejas, en donde no existen sistemas de referencia privilegiados para el aprendizaje, ya que influyen también el lenguaje, el conocimiento empírico y el significado.

Teniendo en cuenta lo anterior, una de las líneas pedagógicas que se considera relevante en la enseñanza de las ciencias naturales es el aprendizaje significativo, en el cual el estudiante se posiciona como constructor de su propio conocimiento. Allí, se toma como referencia o “punto de partida” sus propios saberes, necesidades e intereses, los cuales

¹⁶Particularmente se toma como referencia el trabajo realizado por Margarita Bartolomé “Investigación cualitativa en educación ¿comprender o transformar?”, en el cual se resalta la importancia de la investigación-acción que desde un enfoque interpretativo que “se orienta decididamente al cambio educativo y social”.

propician una mirada integral donde es posible identificar los aspectos cognoscitivos, sociales, psicológicos e incluso afectivos. En esta línea se destaca por ejemplo, la idea de “puentes cognitivos” de Ausubel (1968), quien los considera como anclajes de las relaciones entre las estructuras preexistentes y las nuevas (Giordan,1995).

Sin embargo, las reflexiones alrededor de la mirada constructivista del aprendizaje y las relaciones a partir de los “puentes cognitivos” suscitan a la siguiente pregunta: ¿qué se construye cuando se habla de construcción de conocimiento? Una respuesta asertiva a esta inquietud se suscita mediante la teoría de esquemas propuestas por Piaget. Allí, el sujeto construye esquemas, los cuales se dan a través de la asimilación y la organización cognitiva que tiene el individuo bajo una estructura mental clara, que se configura durante los estadios¹⁷. Esta construcción y organización de esquemas dentro de la estructura mental de toda persona, se da desde los primeros años, que, junto con su interacción con “los otros”, configura la constitución de un lenguaje que permite comunicarse con los demás.

Con respecto a estos planteamientos que yacen del constructivismo, André Giordan y Gérard De Vecchi (1995) proponen una nueva idea que pretende resaltar el papel de la concepción como fundamental en los procesos de aprendizaje. En ese marco, las concepciones se pueden entender como una serie de ideas e imágenes que yacen de la estructura mental de cada individuo. Estas son utilizadas para razonar frente a situaciones problema y son consideradas como instrumentos que son necesarios para el aprendizaje (Giordan y De Vicchi 1995). En este sentido, Giordan (1996) afirma que:

(...) las concepciones no son ni simples recuerdos, ni reflejos de los contextos, sino que se conciben más como producciones originales o, mejor, como un universo de significados construidos por el que aprende, en el que se ponen en juego saberes acumulados, más o menos estructurados (...) (p. 3)

Por esta razón deben ser parte fundamental dentro de todo proceso de aprendizaje,

¹⁷De acuerdo con la teoría cognoscitiva de Piaget, existen cuatro estadios claves en el proceso de conocimiento: Estadio sensorio-motor, estadio preoperatorio, estadio de las operaciones concretas, estadio de las operaciones formales.

dado que, a partir de ellas, se pueden abordar nuevas cuestiones, interpretar situaciones, resolver problemas y dar respuestas explicativas (Giordan, 1995).

Concebir el conocimiento como deconstrucción de concepciones, posibilita reconocer la importancia que tiene en todo proceso de aprendizaje. Detrás de ellas, existen un sin número de inquietudes, significados, que permiten al sujeto establecer relaciones e interpretar su alrededor. Por ende, poner al sujeto en una “perturbación” o “conflicto”, hace que su concepción inicial más que acomodarse, se transforme, se nutra y se relacione junto con esa red de inquietudes, marcos de referencia y símbolos que traía dentro de su concepción “inicial”. En este punto es clave reconocer que no son sólo un “producto”, sino un proceso que se desprende de una actividad elaborada que yace del marco de significación que tiene el individuo y que le proporciona, además, filtrar, seleccionar y elaborar informaciones para establecer relaciones que integra para así aprender (Giordan y De Vicchi 1995). Por este motivo, es clave que dentro de la enseñanza de las ciencias las concepciones sean instrumentos elementales para el conocimiento.

Ahora bien, pensar en estas concepciones hace que sea relevante hablar de los procesos que constituyen su construcción: el lenguaje, la experiencia y el conocimiento. En primer lugar, es clave considerar que estos tres parámetros no pueden concebirse de manera independiente. De hecho, entre ellas existe una relación dialéctica importante pues hacen parte del aprendizaje del ser humano. En ese sentido, afirma Maturana (s.f) “(. . .) nuestro conocer (. . .) sucede en el lenguaje, en la experiencia de ser observadores en el lenguaje” (p. 16). De ahí que las concepciones de los individuos cobren sentido en la medida que se reconozcan emergentes de un entretejido de símbolos, representaciones y marcos de referencia que son propios de los sujetos.



Figura 4.3: Relación dialéctica entre lenguaje, experiencia y conocimiento que se encuentra a la base del aprendizaje. Elaboración propia

Así pues, el lenguaje no puede considerarse aislado del rol que juegan también la experiencia y el conocimiento en el proceso cognitivo; puesto que *“si experiencia es aquello que se vive en la interacción directa con la realidad, conocimiento es aquello que viene como «desprendido» de la realidad misma, y reconstruido, a través de un lenguaje, de manera autónoma”* (Arcá, Guidoni y Mazoli, 1990). Por esta razón, la correspondencia del papel relevante del lenguaje se atribuye a los significados y las experiencias que tienen los estudiantes con sus contextos inmediatos, que les permiten además construir y re-construir sus conocimientos. Lo anterior, emerge de las dinámicas que existen dentro y fuera del aula, así como las diversas formas estructuradas de conocimiento y múltiples maneras de ver la realidad; y que, por medio de la interacción con el otro, permite reconocer al

individuo como ser social, que requiere de la colectividad para construir conocimiento, lo que resalta así su carácter social.

La importancia de esta triada -LEC- en la enseñanza de las ciencias, deriva en el hecho que “el alumno pueda poner en práctica lo que llamamos un “conocimiento sobre un conocimiento” (Giordan,1995) en tanto se apueste a la creación de espacios en los cuales se articulen experiencias, lenguajes y conocimientos que constituyen la relación global entre el hombre y el mundo que lo rodea (Arcá, Guidoni y Mazoli, 1990). Así mismo, reconocer esta relación dialéctica permite entender que el proceso de aprendizaje no puede leerse independientemente de las vivencias de los estudiantes, ya que son uno de los referentes en esas aproximaciones a la explicación de los fenómenos que ocurren en su entorno. Por ende, reconocer la complejidad de esta red de relaciones entre LEC que puede darse dentro de los contextos educativos y trascenderlo a una dimensión social, permite hablar de la cultura en cuanto a su papel fundamental en la construcción de conocimiento.

4.4. Diseño de la propuesta de aula

Los agujeros negros no se encuentran en la experiencia inmediata de los seres humanos, las investigaciones alrededor de ellos requieren de una amplia abstracción conceptual desde las bases teóricas de la física moderna para comprender sus mecanismos de formación, evolución, estructura y funcionamiento. Sin embargo, el acercamiento de personas “no expertas” al tema, ha sido posible gracias a la divulgación científica que cobra importancia en las aulas de clase en la medida que los temas que se abordan resuenan en la escuela. Por ello, el interés de los estudiantes por conocer más sobre esta temática posibilita construir alternativas para su enseñanza, que les permitan trascender de la repetición de la información que se encuentra en las diversas plataformas de internet a relacionarla y encontrar significado a través de una serie de actividades vivenciales.

Es fundamental señalar que los elementos que se toman en consideración para el diseño de cada una de estas actividades, emergen de los criterios epistemológicos y teóricos que se establecieron a partir del estudio disciplinar realizado en este trabajo, los cuales se

orientaban, además, a la búsqueda de conceptos que fueran posibles abordar desde la experiencia como lo fue la masa, la gravitación y la luz.



Figura 4.4: Criterios que configuran el diseño de la propuesta de aula. Elaboración propia.

4.4.1. Fases y momentos de la propuesta de aula

Fase 1: Introducción y contextualización: ¿Cuáles conceptos físicos puedo asociar para explicar los agujeros negros?

Esta fase consta de un momento de intervención y se propone con el objetivo de identificar las ideas que los estudiantes tienen alrededor de la explicación de las características de los agujeros negros. Lo anterior, mediante una actividad encaminada al reconocimiento de las bases conceptuales necesarias para abordar estos fenómenos como lo son la relación entre densidad, masa y volumen; la luz y la gravitación. Para esta actividad, se sugieren

una serie de recursos, instrumentos de recolección y tiempo de intervención las cuales pueden modificarse de acuerdo con el criterio del docente¹⁸.



Figura 4.5: Esquema procedimental de la fase 1 Introducción y contextualización. Elaboración propia.

Momento 1: Sobre los agujeros negros

Recursos: Computador, internet, video-beam, marcadores, hojas, lápices, colores, esferos, celulares.

Descripción de la actividad: El primer momento de la fase consta de dos etapas de trabajo.

Primera etapa (Indagación)

Establezca 5 grupos de 3 estudiantes¹⁹ Luego, proponga las preguntas orientadoras que se señalan a continuación. Asegúrese que cada equipo argumente lo mejor posible cada una de ellas.

¹⁸Es importante mencionar que la modificación de cada uno de ellos, deriva también del contexto educativo en el cual se implemente la actividad.

¹⁹La elección de grupos de trabajo puede cambiar de acuerdo con el criterio del docente.

Preguntas orientadoras:

- ¿Creen ustedes que existen cuerpos invisibles en el universo? Si es así ¿cómo es posible detectarlos?
- ¿Todas las estrellas brillan e iluminan con la misma intensidad en el universo?
- Si los agujeros negros absorben la luz ¿Por qué las imágenes que se observan de agujeros negros tienen luz?
- ¿Creen ustedes que es posible que haya cuerpos de la masa del sol ($1,989 \times 10^{30} kg$) en el tamaño de una canica?
- ¿Cómo es posible determinar la cantidad de masa que tiene un agujero negro?
- ¿Cuáles instrumentos creen que son indispensables para la detección de los agujeros negros en el universo?

Segunda etapa (Ilustración conceptual)

En los mismos grupos de trabajo, solicite a los estudiantes diseñar algunas propuestas que permitan solucionar las siguientes preguntas:

- Grupo 1: ¿Cómo identificar cuerpos invisibles u oscuros en el universo?
- Grupo 2: ¿Cómo medir la velocidad de la luz?
- Grupo 3: ¿Cómo determinar la distancia entre las estrellas y la Tierra?
- Grupo 4: ¿Cómo hallar la masa de un agujero negro?
- Grupo 5: Se dice que la masa que contienen los agujeros negros es cientos de veces mayor que la del sol y está contenida en un espacio igual al de una canica ¿Cómo crees que esto es posible?

Instrumentos de recolección: En la primera etapa, el método para reunir la información se puede realizar mediante clips de audio. En la segunda, las hojas con los dibujos que harán los estudiantes.

Tiempo estimado: 150 minutos (3 horas de clase.)

Fase 2: Acercamiento a la física de agujeros negros: ¿Cómo relaciono conceptos físicos con fenómenos que no puedo estudiar en el laboratorio como los agujeros negros?

Esta fase consta de tres momentos de intervención y se propone con el fin de reconocer las relaciones que encuentran los estudiantes entre los conceptos de masa, gravitación y luz, los cuales se consideran fundamentales en la explicación de la física de agujeros negros a través de una serie de actividades orientadas a enriquecer la experiencia de estos conceptos. Para ello, se establecen una serie de actividades vivenciales orientadas hacia la articulación de las nociones de masa, densidad y volumen, las estrellas oscuras y la velocidad de escape, la gravitación y la trayectoria de la luz, como ejes fundamentales en la explicación de la física de agujeros negros.

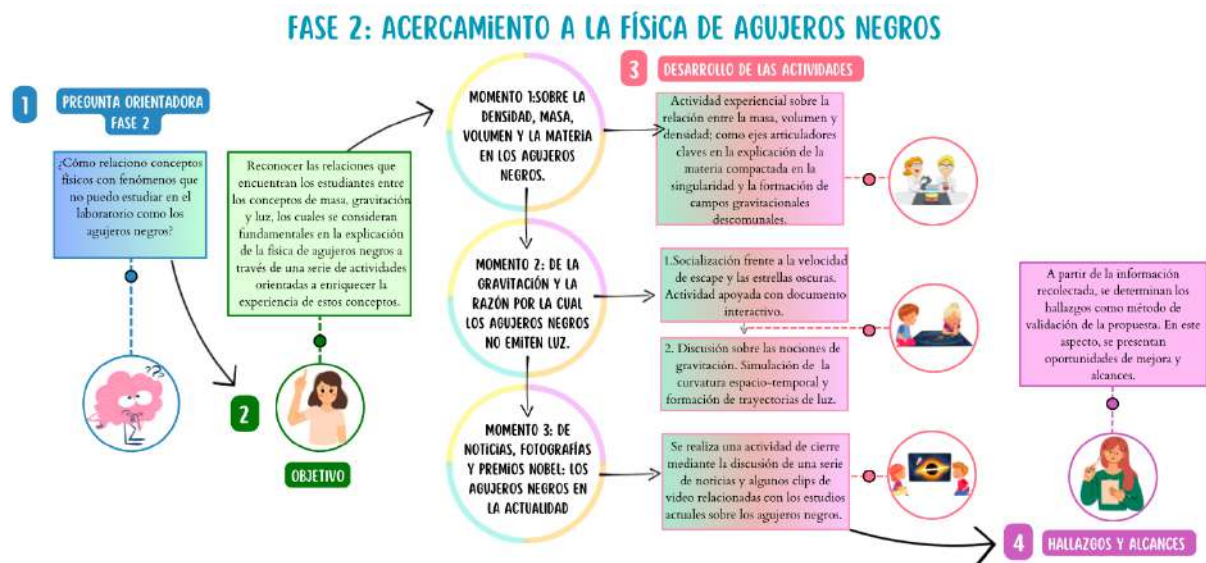


Figura 4.6: Esquema procedimental de la fase 2 Acercamiento a la física de agujeros negros. Elaboración propia.

Momento 1: Sobre la densidad, masa, volumen y la materia en los agujeros negros.

Recursos: Hojas, lápices, pin pones, algodón, arena, agua, piedritas, linaza, vaso precipitado, gramera.

Descripción de la actividad: La siguiente actividad se orienta a la asociación de los conceptos de densidad, masa y volumen los cuales se consideran relevantes para explicar la formación y acumulación de materia en los agujeros negros.

Para el docente:

1. De antesala a la clase prepare por cada grupo de trabajo 5 pin pones en cuyo interior haya agua, arena, algodón, piedritas y semillas de linaza; y 3 canicas de diversos tamaños. Enumere cada una de ellas de acuerdo como se observa en la imagen.



2. En clase comparta a cada grupo 5 pin pones y 3 canicas, una gramera, un vaso precipitado, algodón y cinta; asegúrese que cuenten con hojas, lápices y colores. Luego proponga a los estudiantes la siguiente actividad.

Actividad para los estudiantes

1. Observen y manipulen los 5 pin pones y las 3 canicas que les entregó el docente. Luego, socialicen y resuelvan las siguientes preguntas:

- ¿Qué características físicas pueden distinguir de las esferas entregadas?
- Establezca en grupo una hipótesis sobre cuáles esferas consideran que tiene mayor peso y describan los criterios que tomaron para en cuenta.

• Ordenen las esferas de menor a mayor peso y de menor a mayor volumen. Ubique en la siguiente tabla la respuesta de izquierda (el menor) a derecha (el mayor):

Variable	Número de la esfera							
	Menor masa y volumen				Mayor masa y volumen			
Masa								
Volumen								

2. Después de ordenar las esferas debatan en grupo estos interrogantes y escriban las respuestas:

- ¿Qué hace que el orden entre el peso y el volumen sea diferente?
- ¿Cómo se puede calcular el valor del volumen de las esferas?
- Si los elementos no fueran esféricos ¿Cómo se puede calcular el valor del volumen de esas figuras?

3. Utilizando una gramera, tome la medida de la masa de cada una de las esferas y nuevamente organícelas de menor a mayor masa²⁰:

Variable	Valor en gramos (g)							
	Menor masa				Mayor masa			
Masa de la esfera								
Número de esfera								

4. Utilizando 200ml de agua en un vaso precipitado agregue cada esfera (una por una)²¹. Posteriormente, tome la medida del desplazamiento de agua y reste con el volumen inicial para determinar el valor numérico. Ubique los resultados en la siguiente tabla:

²⁰Es importante en este punto tener en cuenta que la masa se considera como la cantidad de materia que poseen los cuerpos; mientras el peso hace referencia a la fuerza que efectúa la gravedad sobre los objetos.

²¹Para realizar la medida del volumen, se toma en consideración la diferencia entre el volumen inicial del líquido y el desplazado luego de agregar las esferas para tomar el valor de ellas.

Variable	Valor en mililitros (ml)							
	Menor volumen				Mayor volumen			
Volumen de la esfera								
Número de esfera								

5. En el grupo de trabajo socialice y soluciones estas preguntas:

- ¿Cuáles diferencias en la organización encontraron antes y después de pesar y hallar el valor del volumen de las esferas?
- ¿Por qué las esferas de mayor volumen NO necesariamente tienen mayor masa?
- Compare la tabla de respuestas y determine cuáles factores hacen que el orden entre ellas sea diferente.

6. Por grupo tome el algodón que se encuentra sobre la mesa, tal como se observa en la imagen:



7. Luego escriban los factores que consideran claves para aumentar la densidad del algodón ¿Cómo es posible aumentar la densidad de este algodón?

8. Con el algodón que les entregó el docente, realicen una pelota compacta ¿Cuánto algodón consideran que necesita para que pese lo mismo que la esfera No 5?

- A partir de la actividad anterior ¿Cómo interpreta la densidad? ¿Qué indica la fórmula $\rho = \frac{m}{V}$?

Actividad de cierre: De acuerdo con la experiencia anterior, comparta y socialice con los estudiantes la siguiente lectura:

Los agujeros negros

Una de las posibilidades de la formación de un agujero negro, es a través del proceso de colapso gravitatorio que sufre una estrella masiva al finalizar su evolución estelar. Allí, la gravedad sobrepasa cualquier otra fuerza, haciendo que toda la materia circundante sea atraída hacia su centro. Por esta razón, las grandes concentraciones de masa (del orden de cientos de M_{\odot}) generan campos gravitacionales tan extraordinarios que se compactan y generan mecanismos de absorción de toda la materia circundante. Por este motivo, uno de los fenómenos característicos de estas regiones es la formación de singularidades en las cuales la masa se concentra en un volumen reducido, de forma que su densidad es enorme. Por ejemplo, un agujero negro supermasivo puede contener una masa de 66,000 millones de masa solares en un volumen diminuto²².

- Finalice la actividad a partir del siguiente vídeo que simula la absorción de una estrella por un agujero negro: <https://www.youtube.com/watch?v=5gAHf6I9P5A>



²²Es importante recordar que las singularidades son regiones dentro de los agujeros negros que se caracterizan por la presencia de enormes concentraciones de materia, en donde las magnitudes físicas tales como la densidad y la gravedad son infinitas.

Instrumentos de recolección: Las respuestas se tomarán mediante las hojas que se comparten a los estudiantes. Así mismo, es importante que el docente tome apuntes de las discusiones que se generan en el grupo. Adicionalmente, se realizará registro fotográfico.

Tiempo estimado: 200 minutos (4 horas de clase.)

Momento 2: De la gravitación y la razón por la cual los agujeros negros no emiten luz.

Recursos: Computador, Tablet, internet, video-beam, sistema de sonido, marcadores, hojas, lápices, tela elástica, juego de masas.

Descripción de la actividad: La siguiente actividad se centra en el concepto de la velocidad de escape, que se considera relevante para la absorción de materia de un agujero negro. Así mismo, se pretende exponer las perspectivas de la gravitación, en particular de la relatividad general, para reconocer la variación de las trayectorias de la luz en campos gravitacionales y del por qué ésta no escapa.

Primera etapa (Estrellas oscuras y velocidad de escape).

Para el docente:

1. Previamente a la clase, el docente debe contar con el programa interactivo el cual deberá probar con antelación.



2. El docente dará una introducción a la temática a partir de un debate que deberá orientar con el grupo de los estudiantes respecto a la afirmación: “Nada escapa de los agujeros negros”.

Actividad para los estudiantes

1. En cada grupo de trabajo analicen, socialicen y respondan las siguientes preguntas:

- ¿Cómo es posible que los cohetes no caigan de nuevo a la tierra?
- ¿Cuáles condiciones hacen que los cohetes salgan del planeta tierra?
- ¿Qué sucede con la velocidad de los cuerpos a medida que van subiendo?
- ¿Por qué al saltar no nos elevamos tanto? ¿Por qué no puedo salir del planeta?

2. Abran el enlace compartido del Excel e ingresen al archivo interactivo.

3. Seleccionen la opción 1 “¿Sabías qué?” y lea el texto propuesto.

Las estrellas oscuras de Michell y Laplace

Aunque las propiedades de los agujeros negros se desarrollaron con mayor profundidad durante el siglo pasado gracias al desarrollo de la Teoría General de la Relatividad, las primeras ideas sobre su posible existencia se establecieron a finales del siglo XVIII (alrededor de 1783) bajo el nombre de “estrellas oscuras”. Uno de los pioneros en plantear esta idea, fue John Michell quien a partir de la teoría de gravitación de Newton dedujo que las estrellas con suficiente masa atraían con mayor fuerza los objetos hacia su interior haciendo que su velocidad disminuya conforme intentan salir de allí.

John Michell (1724-1793)

P. Simon Laplace (1749-1827)

Así mismo, Laplace estableció que una estrella lo suficientemente densa no permitiría que los rayos salieran de la superficie con facilidad, denominando a estos cuerpos estrellas invisibles. Por ende, la posibilidad para que los cuerpos escaparan de dicha atracción era a través del valor de la velocidad de escape, la cual debería ser lo suficientemente alta para salir de un campo gravitacional determinado.

Diagrama que muestra la Tierra con órbitas circulares y el escape espacial. El diagrama ilustra la Tierra en el centro con una órbita circular etiquetada como 'Circular orbit'. Una trayectoria que se eleva desde la superficie se etiqueta como 'Escape speed'. Una trayectoria que se eleva y luego cae de vuelta a la superficie se etiqueta como 'Sub-orbit' y 'Unbound orbit'. Una trayectoria que se eleva y luego cae de vuelta a la superficie se etiqueta como 'High launch speed' y 'Launch to point A'.

“(…) si un proyectil se lanza hacia arriba con una velocidad suficientemente grande, continuará su movimiento ascendente indefinidamente, pues la gravedad decreciente es demasiado débil para frenarlo y devolverlo a la superficie. Es en este sentido en el que un proyectil puede escapar de la gravedad de la Tierra.” (Suskind, 2009, pp.50-51)

Volver al inicio **Continuar**

4. Comparen las respuestas de la primera pregunta y asóciennlas con la idea de Michell y Laplace.

5. Continúe en el archivo interactivo y observe los valores de la velocidad de escape de los cuerpos astronómicos. Luego, organicen las velocidades de escape de menor a mayor ¿Qué diferencias encuentran entre sus masas y radios?

Cálculo de la velocidad de escape

¿Cómo calcular la velocidad de escape?

Para poder determinar la velocidad de escape de cualquier cuerpo astronómico, es necesario conocer su radio (R), su masa (M) y la constante de gravitación universal de Newton (G). A partir de la energía mecánica de una partícula:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{r}$$

Despejando la velocidad, se tiene que:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{GMm}{r}$$

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

Velocidad de escape de los cuerpos del sistema solar

Cuerpo celeste	Masa (kg)	Radio (m)	Constante gravitacional dentro de la	Velocidad de escape (m/s)	
Sol	1,989.E+30	6,9634.E+08	6,67.E-11	3,810389.E+11	617283,45
Mercurio	3,303.E+26	2,4397.E+06	6,67.E-11	1,8066043.E+10	134389,08
Venus	4,869.E+27	6,0518.E+06	6,67.E-11	1,075275.E+11	327628,77
Tierra	5,976.E+27	6,3781.E+06	6,67.E-11	1,240892.E+11	35338,07
Sirio B	2,025E+30	5,8439.E+06	6,67.E-11	4,825112.E+13	6798966,66
Alpha centauri A	2,0188E+30	8,5112.E+08	6,67.E-11	3,164159.E+11	562508,60
Estrella de Kerevaniki	4,077.E+31	8,3561.E+09	6,67.E-11	6,509414.E+11	806809,39
Púlsar	2,8000E+30	10000	6,67.E-11	3,735200.E+16	193266655,2
Woolwich 49-2	4,073.E+32	3,8430.E+10	6,67.E-11	1,225719.E+12	131.8666.425



Mercury Venus Earth Mars Jupiter Saturn Uranus Neptune

Volver al inicio
Continuar

6. Continúe en el archivo y agregue el valor de la cantidad de masa que cree necesaria para que la velocidad de escape sea igual a la velocidad de la luz.

De la gravitación, la trayectoria de la luz y la razón por la cual los agujeros negros no emiten luz.



La teoría general de la relatividad propuesta por Albert Einstein en 1915, revolucionó de manera fundamental las concepciones de la geometría del espacio-tiempo y de la materia. Puesto que, la gravedad no sería concebida como un resultado de la fuerza de acción a distancia <<interacción>> entre cuerpos tal como lo estableció Newton. En vez de ello, <<deformación>> del espacio-tiempo, lo cual como resultado permite generar un campo gravitacional que hace mover a los cuerpos alrededor de esta concentración de materia.

By Newton, space and time were fixed and gravity was a force pulling objects together.

Einstein determined that space and time are like fabric and masses distort it by being curved inward.



Attractive force of gravity

¿Cuánta masa se requiere para que la velocidad de escape alcance la velocidad de la luz?

Agregue la cantidad de masa que considere necesaria para que la velocidad de escape sea igual a la velocidad de la luz

Masa (kg)	Velocidad de la luz (m/s)	Velocidad de escape (m/s)
7,69E+12	300000000	1,01

Si le aparece la respuesta en rojo, recuerde que, el valor de la velocidad de escape no puede sobrepasar la velocidad de la luz



Volver al inicio

7. Continúe en el archivo interactivo y observe los valores de la velocidad de escape de los cuerpos astronómicos.

- ¿Cuál fue el valor de masa que agregaron?
- Socialice con los demás grupos los criterios que tomaron en cuenta para seleccionarla.

8. Observe el siguiente video sobre la velocidad de escape: <https://www.youtube.com/watch?v=tgHsjvSWQe8>

Segunda etapa (De la gravitación y la trayectoria de la luz)

Para el docente:

1. Previamente a la clase el docente debe contar con una tela elástica y un juego de masas que le permitan curvarla.



2. El docente dará una introducción a la temática a partir de un debate que deberá orientar con el grupo de los estudiantes respecto a la afirmación: “Nada escapa de los agujeros negros”.

Actividad para los estudiantes

1. Socialice con su grupo y complete el siguiente cuadro comparativo:

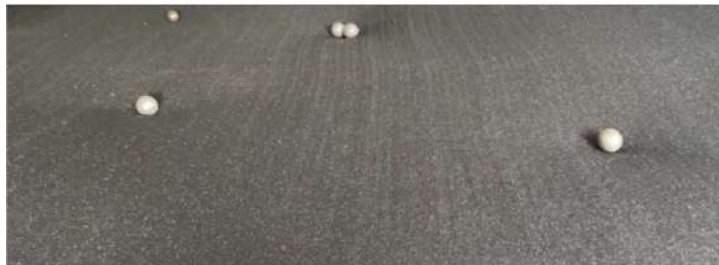


2. En cada grupo de trabajo analicen, socialicen y respondan las siguientes preguntas:

- ¿La luz se propaga en todos los medios de la misma manera? Justifique su respuesta.
- ¿Qué trayectoria consideras que tiene la luz cuando se propaga en el espacio?
- ¿Cuáles factores harían posible que la gravedad afecte la trayectoria de la luz?
- ¿Pueden los agujeros negros emitir luz?

3. Acompañe al docente a la simulación de la curvatura espacio-tiempo mediante una tela elástica.

4. Ubiquen en los puntos que indique el docente un par de masas y seleccione dos compañeros que se ubiquen al extremo de la tela



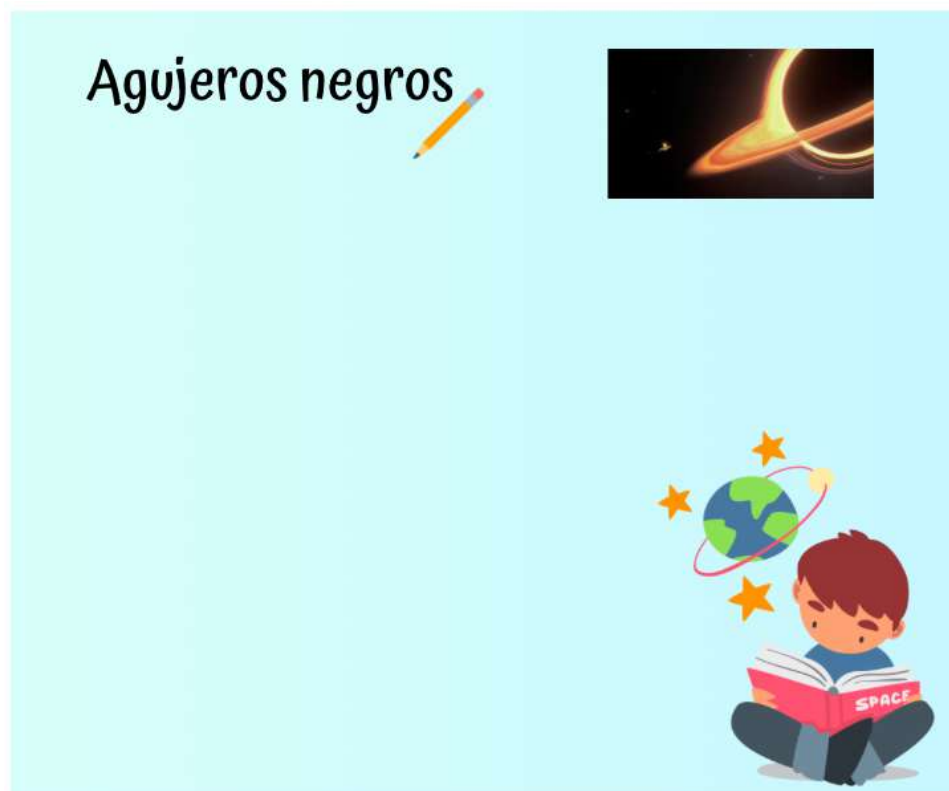
5. Desde los extremos lancen sobre la tela dos canicas e intente identificar la trayectoria que toma cada una.



6. A través de la experiencia anterior, socialice en grupo estas inquietudes:

- ¿Con qué característica de los agujeros negros puede relacionar la experiencia anterior?
- ¿Por qué las canicas caen hacia la curvatura ocasionada por la esfera?
- ¿Cuáles condiciones se requieren para que las canicas logren escapar de la curvatura ocasionada por la esfera?
- ¿Cómo sería posible que las canicas no cayeran de nuevo hacia la esfera?
- Haciendo la analogía con la luz, ¿Cómo podría decirse que se mueve la luz en este caso?

7. Con base en las experiencias anteriores, escriba en el siguiente cuadro los elementos las consideraciones que creen relevantes para describir la física de agujeros negros.:



Actividad de cierre: Finalice la actividad mediante el siguiente video, el cual debe proyectar a los estudiantes: <https://www.youtube.com/watch?v=S-d9LkIf16Y>

Momento 3: De noticias, fotografías y premios nobel: Los agujeros negros en la actualidad

Recursos: Computador, internet, video-beam, sistema de sonido, celulares o Tablet, enlace Padlet.

Descripción de la actividad: La siguiente actividad se propone como actividad de cierre para retomar las noticias y videos que se relacionan con los estudios actuales sobre los agujeros negros. Lo anterior, permite identificar la relación que los estudiantes hacen con las actividades realizadas con antelación.

Para el docente:

1. Es relevante que el docente pueda contar con el material audiovisual y periodístico listo para exponerlo a los estudiantes²³.
2. En este caso se hizo uso del Padlet para recopilar la información dada por los estudiantes. Es clave que este material se encuentre totalmente preparado para compartirlo a los grupos de trabajo.

Actividad para los estudiantes

1. De acuerdo con su grupo de trabajo, abra el enlace correspondiente²⁴:

- **Grupo 1:** <https://cnnespanol.cnn.com/2022/05/12/agujero-negro-galaxia-observatorio-europeo-orix/>
- **Grupo 2:** <https://www.bbc.com/mundo/noticias-54428874>
- **Grupo 3:** <https://www.bbc.com/mundo/vert-fut-58315720>
- **Grupo 4:** <https://cnnespanol.cnn.com/2022/01/06/agonia-estrella-gigante-cientificos-presencian-primera-vez-trax/>

²³De acuerdo con los recursos que tenga el docente, puede seleccionarse la manera en la cual puede proyectar este material. Se sugiere que, en caso de no contar con herramientas tecnológicas, las noticias pueden imprimirse.

²⁴Las noticias que se eligen son de aproximadamente los últimos 4 años, en los cuales los estudios alrededor de los agujeros negros han tenido algunos reconocimientos internacionales tales como los premios nobel.

• **Grupo 5:** <https://www.bbc.com/mundo/noticias-61427974>

2. Lea atentamente cada noticia, discuta con su grupo y responda las siguientes preguntas:

- ¿Qué conceptos físicos se relacionan con la noticia leída?
- De estos conceptos que resaltan ¿Cuáles creen relevantes en la explicación de agujeros negros?
- En las noticias se hace alusión directa a la relatividad general, sin embargo, ¿es posible explicar los agujeros negros a través de la ley de gravitación universal de Newton?
- ¿Cuáles aspectos pueden relacionar con el estudio de los agujeros negros?
- ¿Qué conceptos de las ciencias creen relevantes resaltar para explicar los fenómenos identificados en la noticia sobre agujeros negros?

3. Abra el enlace compartido por el docente, observe los clips de video, socialice y escriba sus respuestas en el Padlet.

De noticias, fotografías y premios nobel: Los agujeros negros en la actualidad.
A través de los fragmentos observados de los videos propuestos, socialicen y respondan las siguientes preguntas.

Un viaje al infinito (Netflix):	Agujeros negros: Al límite del conocimiento (Netflix):	Los Simpson:
<p>- (34:40min- 35:50min) ¿Cómo es posible concebir una curvatura y una densidad infinitas?</p> <p>- (40:21min- 40:40min) ¿Qué considera de la afirmación realizada por el filósofo Kenny Easwaran) sobre la posibilidad de tener en una esfera el infinito?</p> <p>- (51:08min-53:58min) ¿Cómo es posible afirmar que el universo es infinito?</p>	<p>- (56:45min- 57:20min) ¿Por qué se mueven las estrellas más cercanas a los agujeros negros con mayor velocidad?</p> <p>- ¿Qué aspectos puedes resaltar del trabajo realizado para la detección de agujeros negros?</p> <p>- ¿Cuáles elementos teóricos consideras relevantes en la detección de agujeros negros?</p>	<p>La mas grande historia jamas agujerada (Parte 1/2) Los Simpson - La casa del horror</p> <p>- ¿Por qué consideran posible que se creen agujeros negros por medio de un colisionador de partículas?</p> <p>- ¿Por qué el agujero negro se vuelve más grande conforme consume más objetos?</p> <p>- ¿Cuáles serían las consecuencias de que un agujero negro esté en la tierra?</p>

Un viaje al infinito (Netflix):

- ¿Cómo es posible concebir una curvatura y una densidad infinitas?
- ¿Qué considera de la afirmación realizada por el filósofo Kenny Easwaran) sobre la posibilidad de tener en una esfera el infinito?
- ¿Cómo es posible afirmar que el universo es infinito?

Agujeros negros: Al límite del conocimiento (Netflix):

- ¿Por qué se mueven las estrellas más cercanas a los agujeros negros con mayor velocidad?
- ¿Qué aspectos puedes resaltar del trabajo realizado para la detección de agujeros negros?
- ¿Cuáles elementos teóricos consideras relevantes en la detección de agujeros negros?

Los Simpson (Temporada 24, episodio 2):

- ¿Por qué se considera posible que se creen agujeros negros por medio de un colisionador de partículas?
- ¿Por qué el agujero negro se vuelve más grande conforme consume más objetos?
- ¿Cuáles serían las consecuencias de que un agujero negro esté en la Tierra?

Instrumentos de recolección: Tanto en la primera como en la segunda etapa, se recaudará la información a través de dos Padlet. Sin embargo, puede elegirse otra forma de establecerlas de acuerdo con lo que el docente considere pertinente.

Tiempo estimado: 100 minutos (2 horas de clase.)

4.5. Hallazgos, alcances y proyecciones: ¿Una propuesta orientada hacia la Ciencia abierta?

Con el propósito de determinar los alcances, las oportunidades de mejora y las proyecciones de las actividades que se elaboraron en el diseño de la propuesta de aula, fue pertinente ejecutarlas con estudiantes de educación media. Específicamente, la propuesta se llevó a cabo con un grupo de 15 estudiantes (7 mujeres y 8 hombres) quienes oscilan entre los 15 y 17 años, de grado undécimo (A y B) del Colegio Nuestra Señora del Buen Consejo que se encuentra en Bogotá y es de carácter privado. Para llevar a cabo cada una de las actividades, se hizo necesario contar con el espacio del laboratorio de física que contaba con los instrumentos que se requirieron tanto técnicos (básculas, vasos precipitados, entre otros) como tecnológicos (Computador, video beam, sistema de sonido, mesas con conectores eléctricos).

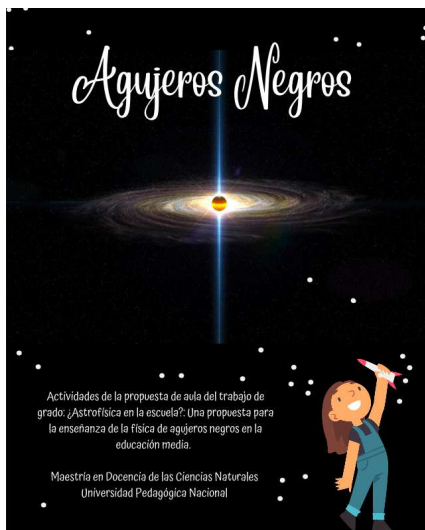


Figura 4.7: Portada de material para los estudiantes. Elaboración propia.

Las actividades propuestas en el diseño, se plantearon compartir a través de un material en línea preparado con antelación que se encuentra en el enlace²⁵. Por otro lado, es importante destacar que los hallazgos que derivan de las respuestas son fundamentales para reconocer la relevancia de los criterios epistemológicos, teóricos, pedagógicos y didácticos que se establecieron tras el estudio disciplinar del presente trabajo. Así mismo, se busca reconocer que este material pueda implementarse por

otros docentes que se encuentren interesados en abordar esta temática en la escuela e incluso a otros sectores de educación no formal como semilleros o clubes de astronomía.

²⁵Enlace de e-book: https://www.canva.com/design/DAFbt1S0t3Q/3XoHqpj0e78FPGEvDXe7_w/view?utm_content=DAFbt1S0t3Q&utm_campaign=designshare&utm_medium=link&utm_source=publishsharelink

Fase 1: Introducción y contextualización: ¿Cuáles conceptos físicos puedo asociar para explicar los agujeros negros?

Mediante el desarrollo de la actividad fue significativo reconocer que, a través de las preguntas propuestas se generaron una serie de debates entre los integrantes de cada grupo de trabajo. Lo anterior, propició un espacio de socialización relevante en el cual desde sus conocimientos previos construyeron una posible solución. A partir de ello, se destaca como común denominador que los estudiantes atribuyen algunas de sus respuestas a los avances tecnológicos y teóricos. De igual modo, se evidenció que ciertos interrogantes efectuaron en ellos confusión, especialmente los que refieren a la determinación de las características de los agujeros negros como su masa y detección, ya que algunos estudiantes hicieron referencia a la posibilidad de hacerlo con los elementos que conocían.

Momento 1: Sobre los agujeros negros.

Durante este primer momento se mostrarán algunos hallazgos de las respuestas de los estudiantes, específicamente con relación a los criterios epistemológicos y teóricos que son la gravitación, la luz, los agujeros negros y la astrofísica de tales regiones espacio temporales²⁶.

En primer lugar, se resalta con respecto a la existencia y detección de cuerpos invisibles en el universo con elementos tales como la materia oscura o los átomos, por ejemplo:

- *“Si, pues existe energía, materia oscura en el universo que no se puede ver a simple vista por eso serían invisibles igual que los agujeros negros que no pueden detectarse tan fácilmente.”*
- *“Si, considero que en nuestro mundo existen partículas que no se pueden evidenciar a simple vista, no se pueden detectar como son los átomos o los*

²⁶La recolección de la información en este caso, fue mediante audios. Por esta razón, fue necesario realizar la transcripción de sus respuestas.

quarks que podrían ser o constituir algo invisible, ya que no son vistas a simple (...) vista”

Otros estudiantes, asociaron también la posibilidad de reconocer que los seres humanos solo distinguen ciertos rangos de luz:

- *“(...) nosotros creemos que sí, ya que consideramos que **hay muchos cuerpos que no son visibles al ojo humano**, cómo sería para detectar un cuerpo de esos, **pues lo que tendríamos que hacer sería alterar de algún modo la forma de ver estos mismos cuerpos** ya sea con un enfoque de luz o un enfoque de lente como en el caso del microscopio o algo por el estilo entonces consideramos que si existen y la forma de ver es con artefactos que alteren la visión del humano.”*
- *“Añadiendo a lo anteriormente dicho creemos también que esta cualidad que tienen los cuerpos físicos para hacerse visible no es como nosotros pensábamos que era su definición que es la invisibilidad, **nosotros tomamos por invisibilidad aquellos cuerpos o aquellas cosas que no existen** cuando en realidad la definición de invisibilidad significa todo lo contrario, **significa que este cuerpo no se hace visible a los ojos del ser humano, pero que en realidad si existen**”*

Adicionalmente, para su detección se relacionaron algunos conceptos tales como la fuerza, así como el avance de la tecnología en términos de instrumentos tales como los telescopios, y la programación:

- *“Eee (...) se puede detectar gracias a los cambios de fuerza que se evidencian cerca de ellos o la desaparición de algunos objetos y pues eso... los cambios de la fuerza”*
- *“(...) es posible detectarlos a través de telescopios si bien son invisibles se pueden ver a través de diferentes filtros (...) o diría yo aspectos los cuales pues mediante **programación, estudio de resultados y análisis que se han realizado a lo largo del espacio** podríamos determinar realmente si, si existen o no existe y si es posible encontrar cuerpos invisibles en el universo”*

En cuanto a la velocidad de la luz, el brillo de las estrellas y los agujeros negros, los estudiantes asociaron algunas de sus respuestas con los conocimientos previos que tenían acerca de ciertas teorías físicas y lo que han aprendido sobre los agujeros negros. Entre las respuestas, se encuentran las siguientes:

- *“(...) según la teoría de la relatividad general por lo que creo es que la velocidad de la luz es la mayor velocidad y es el límite de lo rápido que puede llegar un cuerpo a la mayor velocidad. Se puede determinar que están lejos por cómo titilan, por cómo parpadean las estrellas, eso determina la distancia”*
- *“Bueno consideramos que no todas brillan igual debido a que hay diferentes estrellas y pues cada estrella tiene su distintiva energía y pues la luz o la iluminación que brindan se percibe diferente **dependiendo de la distancia de la estrella en cuanto a la Tierra, consideramos pues que entre más lejos menos luz brindan, pero no pues no quiere decir que tengan diferente energía o algo por el estilo.** Cómo es posible detectarlos, creemos que con los artefactos que la ciencia moderna y en general nos ha brindado a través de la historia como el telescopio”*
- *“Considero que se puede observar en imágenes de los agujeros negros porque **muestra la acción de cómo un agujero negro absorbe la luz que proviene de una estrella.** Entonces uno no está viendo (...) en un instante como toda la energía sino ve como gradualmente ésta lo va absorbiendo.”*
- *“Considero que, en una fotografía de un agujero negro, **el agujero negro si absorbe la luz, pero no de golpe, no la absorbe toda al instante, es progresivamente;** así que la luz cuando se toma la foto sigue estando ahí presente hasta que prolongadamente la consume el agujero negro”*
- *“Bueno toca tener en cuenta que los agujeros negros se parecen de alguna forma ehh (...) la última etapa de la vida de una estrella. Por lo tanto, serán estrellas muertas y absorben todo tipo de masa (...) Entonces por qué hay un aro de luz alrededor de los agujeros negros (...) bueno, **esto proviene debido a un tipo de gas que órbita alrededor de los agujeros negros que tiene componentes***

similares a los del Sol, entonces este gas emite luz infrarroja, ondas y demás y va a tanta velocidad que prácticamente a veces el agujero negro no lo puede absorber.”

- *“Esta luz que se alcanza a ver proviene del horizonte de eventos que es el borde donde alcanza a estar la materia sin ser absorbida por el agujero y pues se puede observar por eso”*
- *“Bueno nosotros consideramos que un agujero negro tiene un rango o un límite en el que absorbe a luz, consideramos que la luz que hace reflejar estos agujeros negros llega hasta un punto en el que el agujero negro no es capaz de absorberla”*



Figura 4.8: Socialización en los grupos de trabajo

Con respecto a la masa, la gravitación y la astrofísica de agujeros negros -particularmente su detección- los estudiantes asociaron los conceptos de masa, densidad y volumen; así como los desarrollos teóricos de la física moderna.

- *“Esto realmente si se puede debido a que **hay diferentes fenómenos y cuerpos en el espacio los cuales pueden tener una masa increíble en un espacio muy pequeño (...)**”*
- *“Pues yo opino que puede haberlos en el universo, pero **sería como ... imaginario**”*
- *“Bueno, yo opino que tal vez si es posible que haya cuerpos con la masa del Sol así de un tamaño muy pequeño porque pues **hay ciertas cosas que tienen muchísima***

densidad entonces sí podría, por ejemplo, las estrellas de neutrones son estrellas pequeñas muy muy pesadas”

- *“También creo que puedan existir puesto a que el gran tamaño no significa que haya mayor masa, eso depende de la densidad del elemento que esté conformado y pues hay ejemplos como el tungsteno y cosas por el estilo”*
- *“Consideramos que si es posible debido a que la masa no es proporcional al tamaño”*
- *“Considero que si podría llegar a ser posible determinar la masa de un agujero negro, sin embargo, para determinar la masa de otros cuerpos en el universo el proceso sería muy diferente en un agujero negro, ya que tengo entendido que después del horizonte de eventos pues nada sale de lo que entra, de lo que consume el agujero negro así que realmente un instrumento que se pueda usar no lo tengo presente”*
- *“Sí, es posible determinar la cantidad de masa que tiene un agujero negro mediante una fórmula, pero también es por la observación de nubes de gases alrededor, por lo que, si en el espacio tiempo las nubes de gas empiezan a alterarse de alguna manera, puede ser por la presencia o ausencia de agujeros negros. Entre más muevan estas nubes de gas mayor será su masa”*
- *“Para la detección yo considero que lo indispensable es el cálculo matemático, pues Einstein descubrió la existencia de los agujeros negros con cálculo matemático”*
- *“Considero que podía ser indispensables instrumentos como un telescopio, pero más allá de eso sería la parte como visual y tener como un plan de investigación para saber en qué puntos podría encontrarse y de qué manera”*
- *“Bueno, yo creo que indispensables podrían ser los satélites que envían señales infrarrojas y distintitos tipos de sondas que permiten saber la ubicación de un agujero negro”*

- *“Pues los instrumentos que consideramos muy importantes para la detección de los agujeros negros son telescopios, instrumentos que puedan captar ondas de radio, así mismo, instrumentos que puedan captar la luz (...)”*
- *“Ehh la verdad no tenemos conocimiento de alguno, pero pues consideramos que deben ser instrumentos que midan tanto la velocidad como el movimiento de los agujeros negros”*

Con respecto a las respuestas que propusieron los estudiantes, se puede observar que existe una noción preliminar alrededor del concepto de agujero negro y la física que hay inmersa en él. No obstante, las inquietudes en cuanto a la masa y detección de agujeros negros generaron en cada grupo de trabajo un debate un poco más largo, ya que algunos se encontraban un poco confundidos y no estaban satisfechos con sus análisis. Otros estudiantes, por su parte, realizaron afirmaciones las cuales parecían ser una repetición de lo que han escuchado por otras fuentes²⁷. Por esta razón, retomar estas ideas que expusieron los estudiantes permitió tomar ciertos elementos que se consideran claves en la elaboración de las actividades vivenciales.

A través de la segunda parte del momento (*ilustración conceptual*) se evidenció que entre las respuestas a las que llegaron los grupos, sobresalieron los cálculos matemáticos como fundamentales para determinar cuerpos invisibles, calcular la velocidad de la luz, la distancia entre la Tierra y las estrellas y, los cuerpos con alta densidad.



Figura 4.9: Elaboración de las ilustraciones en los grupos de trabajo

²⁷Esto se pudo observar ya que, al pasar por los diferentes grupos de trabajo, fue clave que el docente incentivara la reflexión frente a este tipo de respuestas mediante réplicas formuladas como preguntas.

En ese sentido se observó que, uno de los grupos utilizó las ecuaciones aprendidas de cinemática para determinar el valor de la velocidad de la luz (Véase en: Figura 4.10 No. 2), otro equipo mencionó la posibilidad de medir la distancia entre la Tierra y las estrellas con fórmulas sin asociar alguna en específico (Véase en: Figura 4.10 No.3), al igual que los otros integrantes quienes no relacionaron una ecuación particular (Véase en: Figura 4.10 No.5). y, por último, algunos estudiantes atribuyeron los cálculos matemáticos para determinar cuerpos invisibles, donde mencionan a Einstein y su ecuación más famosa $E = mc^2$ (Véase en: Figura 4.10 No.1).

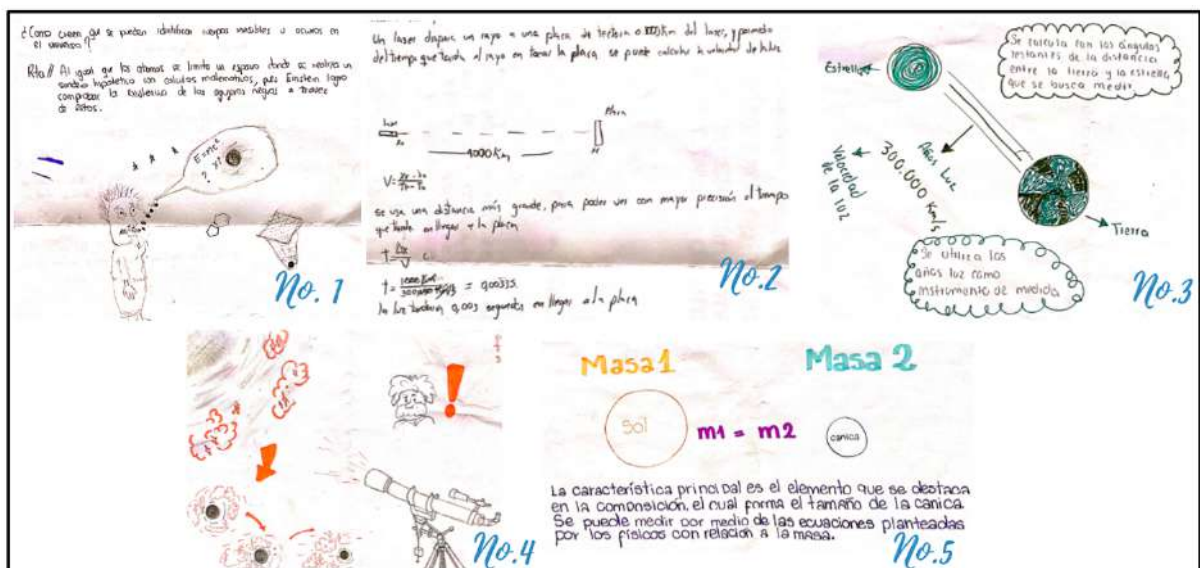


Figura 4.10: Ejemplos de ilustraciones realizadas por los grupos de trabajo

Sin embargo, fue significativo observar cómo un grupo de trabajo relacionó el telescopio convencional para explicar su modelo en cuanto al cálculo de la masa de un agujero negro (Véase en: Figura 4.10 No.4). Esto, se consideró relevante ya que asociaron elementos que hacen parte de su experiencia y conocimiento previo. Además, estas preguntas desencadenantes fueron claves ya que incentivó en la mayoría de los grupos el debate y la socialización, lo cual se resalta, reconociendo el carácter social en la construcción del conocimiento científico.

Fase 2: Acercamiento a la física de agujeros negros: ¿Cómo relaciono conceptos físicos con fenómenos que no puedo estudiar en el laboratorio como los agujeros negros?

El desarrollo de esta fase tuvo una serie de dificultades que no permitieron realizarla progresivamente²⁸. Sin embargo, se abrieron espacios para realizar con los estudiantes las actividades que se diseñaron alrededor de experiencias respecto a la masa, densidad y volumen, la luz y la gravitación. Con ello, se reconocieron algunos aspectos en cuanto a la relación que los estudiantes establecieron entre sus conocimientos en física y los ejercicios planteados. Así mismo, la socialización entre los estudiantes se consideró como elemento fundamental dentro de la construcción de explicaciones que realizaron.

Momento 1: Sobre la densidad, masa, volumen y la materia en los agujeros negros.

En este primer momento de la fase 2, se expondrán los hallazgos que se encontraron luego de la ejecución de las actividades con los estudiantes. Entre ellos, se resaltó la relevancia de elaborar un material que aterrizó dichas características de la física de agujeros negros a situaciones vivenciales en el aula.

Luego de compartir el material virtual con los estudiantes, se solicitó revisar y realizar la actividad No. 1 de la fase 2, para su elaboración fue indispensable el acompañamiento de la docente. Mediante su elaboración, se encontraron los siguientes hallazgos.

- En cuanto a las características que encontraron de las esferas se destacan el peso, el color, el contenido, la textura, la densidad y el tamaño.
- La organización -de menor a mayor- de las esferas por su masa y volumen antes de su medición fue indispensable, ya que mencionaron la densidad como variable que determina que su orden sea diferente.
- Para la medición del volumen los estudiantes mencionaron que la posibilidad de hacerlo era a través de la sombra de las esferas que formaban una circunferencia y

²⁸Estas dificultades responden a situaciones ajenas a la práctica docente.

así determinar su radio aplicando la fórmula. Sin embargo, consideraron que para figuras irregulares era mediante la división de ellas a unas que fueran regulares y por otro lado confirmaron que no sabían cómo hacerlo.

- Al realizar la medición con los elementos que se suministraron, las diferencias que encontraron entre ellas fueron respecto a la masa, más que al volumen.
- Comentaron que no era posible medir el volumen de los pin pones a través del volumen sumergido, ya que flotaban. Sin embargo, encontraron que uno de ellos no flotó por lo que decidieron tomar las medidas.
- Encontraron que la diferencia entre ellas era la densidad que, tal como afirmaron los estudiantes “(. . .) no es directamente proporcional al volumen”



Figura 4.11: Actividad vivencial sobre la masa, densidad y volumen

- Al realizar la actividad con el algodón, describieron que la posibilidad de aumentar la densidad de éste era agregando elementos más pesados, mojándolo con agua, agregando las esferas utilizadas en la actividad anterior. En su mayoría hacían alusión al aumento de masa, sin tener en cuenta la variable del volumen.
- Luego de la socialización y el debate que surgió, dedujeron que la posibilidad de aumentar su densidad era comprimiéndolo.
- Al realizar este ejercicio, se solicitó a los estudiantes comparar el algodón comprimido con la esfera más masiva.
- Al ver que no se comprimió lo suficiente, se repartieron unos elementos para rellenar con la cantidad de algodón que más podían y allí intentaron comparar con la esfera más masiva.



Figura 4.12: Actividad vivencial sobre la masa, densidad y volumen

Al realizar la prueba de validación de la propuesta en el aula, fue clave identificar que trabajar con elementos tales como computadores, tablets o celulares se convirtió en un reto en la medida que algunos estudiantes consultaron si había posibilidad de realizar búsquedas por internet; ya que consideraron que sus respuestas podían estar incorrectas²⁹. Con respecto a ello, se invitó a todos los integrantes de los grupos a la apuesta de un ejercicio reflexivo y consciente, donde tomaran el tiempo para analizar, socializar, debatir y construir una respuesta alrededor de las inquietudes planteadas. Por esta razón, los minutos propuestos inicialmente se extendieron más; de modo que fue oportuno abrir otros espacios para su ejecución.

Por otro lado, se evidenció que los alcances que tiene esta propuesta es la población de su implementación, ya que puede ser empleada para estudiantes de básica y media e incluso para un público general³⁰. Sin embargo, para este propósito, se requiere de una preparación previa de las actividades, dado que la metodología de su ejecución, debe responder a unas dinámicas particulares de los contextos a trabajar³¹. Así mismo, se

²⁹Estas dificultades que son un común denominador en el campo educativo, emergen del uso indiscriminado de internet en la sociedad actual. No obstante, en este trabajo se reconoce la importancia de esta red informática en cuanto a las herramientas que provee, ya que pueden ser utilizadas en pro de los procesos de aprendizaje de los estudiantes.

³⁰Con ello se hace referencia, especialmente, a la población que tenga interés por la astrofísica y los agujeros negros; sea en sectores formales e incluso informales. Por ejemplo, puede llevarse a clubes de astronomía para niños, niñas y adolescentes, a clases de astronomía en las cuales no se cuente únicamente con personas “expertas” o en formación de alguna ciencia exacta.

³¹Al respecto se resalta que, de acuerdo con su contexto, es el docente quien elige cómo abordar las actividades ya propuestas. Es posible que se realicen algunas modificaciones en cuanto a los instrumentos

reconoce que la iniciativa orientada a la enseñanza de los agujeros negros, apunta especialmente a transgredir la divergencia que hay entre la comunidad científica y la sociedad, que responde a la necesidad de configurar una perspectiva democrática de las ciencias exactas.

Bajo estas consideraciones, se concibe este trabajo como una iniciativa por aportar a la ciencia abierta, ya que:

1. Responde a unas necesidades comunes en la escuela, como lo fueron las inquietudes alrededor de los agujeros negros.
2. Diseña y crea de una serie de recursos que facilitaron a los estudiantes acercarse al conocimiento científico mediante el análisis, la reflexión, el debate y la socialización.
3. Reconoce el valor de la divulgación científica en la actualidad -en este caso los videos y las noticias-, como promotora de llevar la investigación a todo el mundo. No obstante, la retoma como material de estudio para analizarla e intentar comprenderla.
4. Pretende ser un aporte al campo de la enseñanza de la astrofísica en el país que se encuentra aún incipiente.

Finalmente, es una iniciativa que “(...) contribuye al cierre de brechas de conocimiento científico, tecnológico y de innovación (...)” (Ministerio de Ciencia, tecnología e innovación, 2022, p. 22), puesto que la investigación en el campo de la astrofísica de agujeros negros se asigna especialmente a las agencias espaciales (NASA, ESA), e incluso a un rango determinado de centros educativos. No obstante, la posibilidad de fomentar espacios de aprendizaje tanto en estudiantes como en docentes de formación, permite que la ciencia sea “(...) accesible, eficiente, transparente y beneficiosa para todas y todos” (UNESCO, 2020) y por ende su enseñanza en todo nivel sea significativa.

de recolección, tiempo, grupos de trabajo, entre otros.

Capítulo 5

Reflexiones finales

Actualmente la astronomía ha cobrado un papel significativo en la sociedad, gracias a los diversos avances de orden tecnológico y teórico que han configurado la mirada que como seres humanos tenemos del universo. Particularmente, los desarrollos que se han realizado en la detección de ondas gravitacionales y fotografías de agujeros negros, hacen que el estudio acerca del cosmos tenga un mayor atractivo para los estudiantes en la escuela por su carácter enigmático e intrigante. Por esta razón se reconoce la importancia de abordar estas temáticas en la educación media, ya que abre nuevas perspectivas en cuanto a la enseñanza de las ciencias naturales en la medida que posibilita la creación de escenarios que respondan a aquellas necesidades que se identifican en el aula.

Se reconoce que existen una serie de problemáticas alrededor de la enseñanza de la astronomía las cuales responden a cuestiones de orden estatal, ministerial e incluso de las propias instituciones de educación básica, media y superior. En primer lugar, uno de los factores que dificultan el desarrollo de este campo de conocimiento es la escasa inversión por parte del estado en la ciencia y la investigación en el país. Además, del poco financiamiento que tienen las universidades públicas en materia de infraestructura (Laboratorios, observatorios, entre otros). Al mismo tiempo, se evidencia que las temáticas de las ciencias naturales en la escuela están determinadas por los lineamientos curriculares definidos por los estándares establecidos por el MEN, en donde los aspectos relacionados con la astronomía se delegan a los maestros de sociales, lo cual dificulta su profundización. De igual modo, se concibe la escasa formación de maestros en esta disciplina, dado que no

se considera en algunas universidades como materia obligatoria, originando así, ciertas falencias en el aprendizaje que se requiere para llevarla a cabo en la escuela. Finalmente, el material que utilizan los maestros en la preparación de las clases de física dificulta ahondar sobre los aspectos históricos y epistemológicos de las ciencias, tanto que la interpretación de los textos, responde a una ciencia que es estática e irrefutable.

Si bien estas problemáticas han dificultado potenciar la astrofísica como campo investigativo en el país, es relevante mencionar que, desde la formación de licenciados en ciencias naturales muchos maestros han apostado por crear e incentivar una serie de propuestas encaminadas a contribuir con el desarrollo de la enseñanza de la astronomía en la escuela. Por esta razón, se consideró esencial impulsar este propósito mediante el diseño de una propuesta de aula encaminada a la física de agujeros negros. Lo anterior, estableciendo algunos criterios de orden epistemológico, teórico, pedagógico y didáctico, que se consideraron fundamentales en la construcción de las actividades en cada fase y momento planeado.

Precisamente para encaminar este trabajo, fue necesario establecer inicialmente algunos elementos de orden teórico que contribuyeran a la profundización disciplinar en la historia y la epistemología de la física. En ese sentido, la revisión bibliográfica permitió determinar como ejes principales el estudio de la gravedad, la luz y la astrofísica de agujeros negros; que aportaron a la reflexión crítica del conocimiento científico y la enseñanza de las ciencias naturales. Es relevante destacar que la consulta preliminar condujo a plantear una serie de aspectos en cada capítulo, cuya secuencia permitiera hilar los conceptos clave de la física de agujeros negros. De igual manera, se precisa mencionar que si bien el estudio alrededor de la gravedad se ubica en lugares ontológicos distintos como la fuerza gravitacional, campo gravitacional y ondas gravitacionales, su profundización permite tener una mirada más amplia de los fenómenos gravitacionales y con ello de las diversas perspectivas que pueden dar lugar a nuevas investigaciones que profundicen en su enseñanza.

El estudio histórico-epistemológico sobre la gravedad, la luz y la astrofísica de agujeros negros, contribuyó de forma significativa a la profundización disciplinar como docente de

física. Particularmente, reconocer los procesos que se dan dentro de la actividad científica alrededor de la construcción de conocimiento, hace que se tenga un panorama estructurado que transforma la mirada de las ciencias exactas y de las prácticas pedagógicas. Por esta razón, una de las contribuciones más significativas que se resaltan del presente trabajo, deriva del reto que implicó la búsqueda de fuentes primarias originales y con ello las traducciones al español del alemán, francés, portugués e inglés. Lo anterior, ya que se consideró fundamental que ellas contaran con una buena interpretación con el fin que el texto contara con sentido y coherencia.

La descripción de las características de los agujeros negros a través de los avances realizados en el campo de la astrofísica fueron determinantes para reconocer su estado actual, especialmente en lo que refiere a su detección -lo cual es frecuente escuchar en el aula de clase-. En este aspecto, se destaca el desarrollo que tuvo esta disciplina a mediados del siglo pasado en la que tanto los progresos de orden teórico como tecnológico, permitieron progresivamente identificar otras propiedades de estas regiones espacio temporales que atribuyeron su carácter dinámico, tal como la rotación y la carga eléctrica. Adicionalmente, los hallazgos respecto a su localización mediante lentes y ondas gravitacionales, abre nuevas perspectivas frente a la investigación del universo junto con los procesos que yacen en su inmensidad.

Tras esta profundización histórica-epistemológica acerca de los agujeros negros, se realizó una descripción de los aspectos pedagógicos y didácticos. Se reconoció en primer lugar, las perspectivas de la enseñanza de la astronomía; posteriormente, los trabajos relacionados con su didáctica e innovación educativa y, finalmente, una reflexión que emerge de la mirada crítica hacia la práctica como docente de ciencias naturales. Todo ello, con el fin de establecer los criterios en los que se basó el diseño de la propuesta de aula.

A partir de lo anterior, se reconoció que los avances tecnológicos en la astronomía han proporcionado que esta disciplina se destaque en el campo educativo, ya que los estudiantes han mostrado un interés particular por su aprendizaje. Por ende, las perspectivas con relación a su enseñanza la posicionan como un área de gran potencial tanto que articula las ciencias naturales con las ciencias humanas. El planteamiento expuesto, rescata la

mirada de una ciencia que emerge de la actividad cultural, abre un espacio de reflexión sobre la desarticulación de la construcción epistémica del saber científico como verdadero, absoluto y dominante. De ahí que logra configurar este panorama en la medida que posibilita vincular la importancia del colectivo, con las dinámicas sociales que favorece, además, la constitución de un enfoque contextualizado en la que la astronomía ha hecho parte de la historia de la humanidad¹.

Por esta razón, la posibilidad de enseñarla presenta un desafío especialmente en la elaboración del material que se llevará al aula, ya que debe responder a una serie de necesidades que estén en consonancia con el contexto a desarrollar. En este aspecto, se destaca la importancia de la didáctica de la astronomía que al ser un campo que se encuentra en auge, exige por parte de los docentes la creación de propuestas que mantengan la rigurosidad conceptual entre lo astronómico y lo pedagógico. Dicho esto, reconocer el panorama actual de la astrofísica y la incidencia que ella tiene en la escuela, la posiciona como un proceso cuidadoso, creativo y dinámico (Camino, 2018). Bajo estas consideraciones, es relevante mencionar que uno de los retos más significativos de este proyecto, fue la constitución de actividades vivenciales relacionadas con la física de agujeros negros, siendo estos fenómenos alejados de la experiencia inmediata. Sin embargo, se rescata como aspecto esencial para su construcción el abordaje teórico (disciplinar, pedagógico y didáctico), puesto que logró configurar una serie de experiencias que lograron rescatar las relaciones que establecen los estudiantes dentro de los procesos de aprendizaje.

Los desafíos que enmarcaron el diseño de la propuesta de aula se alejan de la perspectiva del docente que “transfiere” conocimiento, ya que toma una postura crítica y reflexiva de sus prácticas que permite romper con la mirada dogmática de la educación. De igual modo, propicia un escenario en donde la praxis del educador se transforma en la medida que se conciba a sí mismo como intelectual e investigador. Reconocer la importancia de una enseñanza contextualizada, es responder a las necesidades de los estudiantes a partir de las diversas formas de conocer y tejer experiencias. Además, incentiva la comprensión de las realidades educativas en donde el estudiante adquiere un papel protagónico dentro

¹Como menciona Camino (2018), la astronomía es una disciplina que, como personas, nos une en tiempos con los seres humanos que alguna vez se han preguntado por su existencia y lugar en el universo.

de sus procesos de aprendizaje.

De acuerdo con lo anterior, es fundamental reconocer que situar al estudiante como constructor de su conocimiento, implica una interacción con su entorno a partir del lenguaje y la experiencia. De ahí que, fue clave dentro de la elaboración de la propuesta de aula la idea de *concepción* de Giordan y De Vecchi, ya que las preguntas desencadenantes (“conflictos”) juegan un papel importante, pues hace que estas *concepciones iniciales* pierdan su sentido, lo cual permite nuevas perspectivas de interpretación y resolución que transforman y/o nutren los marcos de significación que le posibilita tejer relaciones para aprender. Con ello, se retoma la triada *lenguaje, conocimiento y experiencia* como ejes articuladores indispensables dentro de los procesos de enseñanza. La relación dialéctica que hay entre ellas reconoce que el aprendizaje no puede leerse de forma independiente a la vivencia de los estudiantes. Por esta razón, fue fundamental que el diseño contara con actividades experienciales en las cuales los estudiantes lograran articularlas con la explicación de la física de agujeros negros. De hecho, pueden ser indispensables en la resignificación del concepto.

Bajo estas consideraciones, el diseño de la propuesta de aula se basó en una serie de criterios epistemológicos, teóricos, pedagógicos y didácticos que emergen del estudio realizado a lo largo de este trabajo (Véase en: Figura 4.4). Sin embargo, es importante resaltar que las actividades se proyectan llevarlas a través de un e-book que fue elaborado por la docente. De hecho, las herramientas tecnológicas jugaron un papel clave en la construcción del diseño, ya que se requiere el apoyo de simulaciones, imágenes y videos, para retroalimentar ciertos conceptos. Como prueba de validación de estas actividades, se propuso realizar una implementación con estudiantes de grado undécimo.

En este punto se destaca que, aunque los agujeros negros no hacen parte de la experiencia inmediata de los seres humanos, existen muchos medios -como la divulgación científica- que se encuentran al alcance de los estudiantes y que intervienen en las concepciones que se tienen acerca de ellos. Por este motivo, tras la puesta en marcha de las actividades, fue pertinente evidenciar que, los estudiantes tienen una noción preliminar sobre la física de los agujeros negros y atribuyen como parte fundamental para su estudio

los avances tecnológicos. No obstante, se resalta que las preguntas propuestas desencadenaron una serie de debates en algunos grupos, ya que se generaron inquietudes respecto a la detección de los agujeros negros. Otros, por su parte, realizaron afirmaciones que parecían ser repetición de lo que han escuchado en otras fuentes; mientras algunos indagaban sobre la posibilidad de buscar en internet.

Por este motivo, la puesta en marcha de este diseño permitió identificar que trabajar con elementos electrónicos, se convierte en todo un reto; ya que existe una fuerte tendencia a “investigar” todo por internet. Adicionalmente, fue clave observar que en varias respuestas hubo una serie de contradicciones, las cuales se derivan posiblemente de la saturación de información que hay en la red. No obstante, el reto fundamental como docentes no es rechazar estas herramientas tecnológicas dentro de la educación. Por el contrario, se considera que es fundamental transformar el uso de ellas en la medida que contribuyan a los procesos de aprendizaje de los estudiantes. De ahí que, se constituye como una alternativa que aporta elementos para pensar en la enseñanza y didáctica de la astrofísica en la escuela.

Por otro lado, las discusiones que se observaron en los grupos permiten que esta propuesta a futuro puede ser llevada a sectores de educación no formal, como clubes de astronomía, semilleros de astronomía, grupos de divulgación científica, cursos electivos de astronomía, entre otros; de manera que se concibe trabajar en cualquier edad. Para ello, se proyecta retomar el material para preparar las intervenciones que respondan a las dinámicas particulares de los contextos en que se pretende trabajar. De ahí que, pueda ser una iniciativa por aportar a la ciencia abierta en la medida que aporta nuevas perspectivas para la enseñanza de la astrofísica en el país.

Finalmente, es relevante mencionar que la elaboración de este trabajo contribuyó de forma significativa a mi formación como docente tanto a nivel disciplinar como pedagógico. Situarse como maestro intelectual e investigador desde una postura crítica implica que reflexión y acción estén encaminadas hacia una conciencia social y política que contribuya a la transformación de realidades, en las cuales se anule la posibilidad de cosificar al ser. Así mismo, fue posible reconocer la riqueza que trae un campo de conocimiento como

la astronomía. Fomentar su aprendizaje permite situarnos en una postura más humana, en la cual pensar por un momento en la infinitud del universo debería permitirnos coexistir de forma más responsable con otras vidas en la Tierra. De ahí que contemplar las ciencias naturales desde un enfoque crítico permite desestructurar y erosionar la imagen de la racionalidad instrumental del mundo occidental, en la cual el hombre se posiciona en un rol hegemónico ante la naturaleza, impidiéndole pensar de manera trascendente su existencia y devenir, ante la inmensidad del universo y sus leyes donde los seres humanos nos diluimos en la nada. . .

Bibliografía

- [1] ARCÁ, M, GUIDONI, P Y MAZOLI, P. (1999). “*Enseñar Ciencia. Cómo empezar: reflexiones para una educación científica de base*”. Capítulo I: El desarrollo del proceso cognitivo como tarea de la educación. Ediciones Paidós, Barcelona.
- [2] ASPECT, A. (2017). “*From Huygen’s waves to Einstein’s photons: Weird light*”. Comptes Rendus Physique. Vol. 18 (498-503). Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2017.11.005>
- [3] AYALA, M (2016). “*Los análisis histórico-críticos y la recontextualización de saberes científicos. Construyendo un nuevo espacio de posibilidades*”. Pro-Posições, 17 (1) pp. (19-37). Recuperado de: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/proposic/article/view/8643653>
- [4] BAADE, W Y ZWICKY, F. (1934). “*Cosmic rays from super-novae*”. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. Vol. 20. pp. (259-263). Recuperado de: <https://www.pnas.org/doi/epdf/10.1073/pnas.20.5.259>
- [5] BARTOLOMÉ, M. (1992). “*Investigación cualitativa en educación*”. Revista Investigación Educativa. No. 20.
- [6] BARTUSIAK, M. (2016). “*Agujero negro. La evolución de una idea*”. Crítica Editorial.
- [7] BENNETT, J. DONAHUE, M. SCHNEIDER, N. Y VOIT, M. (2018). “*The cosmic perspective*”. Eighth edition. Pearson editorial.
- [8] BENNETT, J. DONAHUE, M. SCHNEIDER, N. Y VOIT, M. (2020). “*The cosmic perspective*”. Ninth edition. Pearson editorial.

- [9] CAMINO, N. (2011). “*La didáctica de la astronomía como campo de investigación e innovación educativas*”. I Simpósio Nacional de Educação em Astronomia. Río de Janeiro, Brasil. Recuperado de: http://snea2011.vitis.uspnet.usp.br/sites/default/files/SNEA2011_Palestra_Camino.pdf
- [10] CAMINO, N; NARDI, R; PEDREROS, R. ET AL. (2016). “*Retos de la enseñanza de la astronomía en Latinoamérica*”. Revista Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias e-ISSN: 2346-4712 Vol. 11, No. 1. pp (5-6). Recuperado de: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/GDLA/article/view/10617/11610>
- [11] CAMINO, N. (2018). “*Reflexiones sobre la enseñanza de la astronomía*”. Revista Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias e-ISSN: 2346-4712 • Vol. 13, No. 2. pp. (193-194). Recuperado de: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/GDLA/article/view/13679/pdf>
- [12] CAMINO, N. (2018). “*La enseñanza de la Astronomía: nuestro vínculo con la gente*”. Asociación Argentina de Astronomía. Vol. 60 pp. (280-284). Recuperado de: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/73002>
- [13] CAMINO, N. (2021). “*Diseño de actividades para una didáctica de la astronomía vivencialmente significativa*”. Revista Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias e-ISSN: 2346-4712 Vol. 16, No. 1. pp (15-37). Recuperado de: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/GDLA/article/view/16609/16679>
- [14] CARDONA, A.R. (2012). “*Breve historia de la Astronomía*”. Madrid, España. Nowtilus, S.L
- [15] CARDONA, P. (2016). “*Análisis y formalización del proceso de colapso gravitacional en el marco de la relatividad general*”. Trabajo de grado: Universidad de Pedagógica Nacional, Licenciatura en física.
- [16] CASSINI, A. (2015). “*Un experimento crucial de Galileo sobre la velocidad de la luz*”. Vol. 23 No. 143. pp. (45-50) Recuperado de: https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/52957/CONICET_Digital_Nro.f554ddf1-6d9e-49d1-b4f6-f0fc33f98aa4_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y

- [17] CONICYT. (2019). “*La educación y la astronomía se encuentran en Temuco*”. Recuperado de: <https://www.conicyt.cl/astroeducacion2019/files/2019/08/20190903-COMUNICADO-Cumbre-Temuco21.pdf>
- [18] CHANDRASEKHAR, S. (1934). “*Stellar configurations with degenerate Cores*”. The Observatory Provided by NASA Astrophysics Data System. Vol. 57, p. 373-377. Recuperado de: https://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-iarticle_query?19340bs....57..373C&defaultprint=YES&filetype=.pdf
- [19] CHOMSKY, N. (2001). “*La (Des) educación*”. Editorial Crítica, Barcelona, España
- [20] D’INVERNO, R. (1992) *Introducing Einstein’s relativity*. New York, United States: Clarendon press.
- [21] DE BOER Y W. SEGGEWISS, K. S. (2008). “*Stars and stellar evolution*”.EDP sciences.
- [22] DÍAZ-BARRIGA, F Y HERNÁNDEZ, G. (2002). “*Estrategias docentes para un aprendizaje significativo: Una interpretación constructivista*”. McGraw-Hill interamericana, 2da Edición, México D.F.
- [23] DYSON, F, EDDINGTON, F, DAVIDSON, C. (1919). “*A determination of the deflection of light by the Sun’s gravitational field, from observations made at the total eclipse of May 29, 1919.*”. Philosophical transactions of the Royal Society. Series A, containing papers of a mathematical od physical character, 220 (pp. 291-333).
- [24] EDDINGTON, A. (1920). “*The Internal Constitution of the Stars*”. Nature 106, pp. (14–20). Recuperado de: <https://doi.org/10.1038/106014a0>
- [25] EINSTEIN, A. (1905). “*Zur Elektrodynamik bewegter Körper*”. Annalen der physik. Vol. 322. pp. (891-921) Recuperado de: <https://doi.org/10.1002/andp.19053221004>
- [26] EINSTEIN, A. (1907). “*Über den Einflußder Schwerkraft auf die Ausbreitung des liches*”. Annalen der Physik 35, pp. (898-908). Recuperado de: <https://doi.org/10.1002/andp.19053221004>

- [27] EINSTEIN, A. (1915). “*Die Feldgleichungen der Gravitation*”. Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte. pp. (844-847). https://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/get_file?pdfs/SPAW./1915/1915SPAW.....844E.pdf
- [28] EINSTEIN, A. (1918). “*Über gravitationwellen*”. Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften (pp. 154 - 167). Recuperado de: <https://echo.mpiwg-berlin.mpg.de/ECHOdocuView?url=/permanent/echo/einstein/sitzungsberichte/W7ZU8V1E/index.meta>
- [29] EINSTEIN, A. (1922). “*The meaning of relativity*”. United States of America: Princeton University Press.
- [30] EISENSTAEDT, J. (2015). “*Antes de Einstein: relatividad, luz y gravitación*”. Editorial: Fondo de Cultura Económica, México D.F.
- [31] FERRÉ, R. M. R. (2017). “*El cielo nocturno: La observación del universo a lo largo de la historia*”. Un paseo por el cosmos. RBA coleccionables, S.A.
- [32] FREIRE, P. (2005). “*La pedagogía del oprimido*”. Segunda edición, México: Siglo XXI Editores S.A.
- [33] GANGUI, A; IGLESIAS, M; QUINTEROS, C. (2007). “*Alfabetización científica: La astronomía en la escuela*”. Asociación Argentina de Astronomía. Vol. 50 pp. (1-4). Recuperado de: https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/20844/CONICET_Digital_Nro.25152.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [34] GEORGES, JEAN. (2000). “*Bachelard, “La infancia y la pedagogía*”. Fondo de cultura económica Ltda. Bogotá, Colombia.
- [35] GIORDAN, A. (1995). “*¿Cómo ir más allá de los modelos constructivistas? La utilización didácticas de las concepciones de los estudiantes*”. Recuperado de: <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/59699/>
- [36] GIORDAN, A. Y VECCHI, GÉRARD DE. (1995)). “*Marco teórico: dimensiones conceptuales de la idea de “concepción personal*”. Capítulo I. Tomado de: Los Orígenes

- del saber, Fundamentos N° 1, Colección Investigación y Enseñanza. Editorial S. L. Sevilla.
- [37] GIORDAN, A. Y VECCHI, GÉRARD DE. (1995). “*El papel del conflicto. Capítulo IX*”. Tomado de: Los Orígenes del saber, Fundamentos N° 1, Colección Investigación y Enseñanza. Editorial S. L. Sevilla.
- [38] GIORDAN, A. (1996). “*Los nuevos modelos de aprendizaje: ¿Mas allá del constructivismo?*”. Recuperado de: <https://www.andregiordan.com/espagnol/2.%20Mas%20alla%20del%20constructivismo.pdf>
- [39] GIORDAN, A. (1996). “*Aprender*”. Recuperado de: https://aprender-giordan.net/wp-content/uploads/sites/42/2020/05/GIORDAN-Aprender_final-3.pdf
- [40] GIROUX, H. (1997). “*Los profesores como intelectuales: Hacia una pedagogía crítica del aprendizaje*”. Ediciones Paidós Ibérica, S.A, Barcelona, España.
- [41] GIROUX, H. (2013). “*La pedagogía crítica en tiempos oscuros*”. Praxis Educativa (Arg). ISSN: 0328-9702 Vol. XVII. No. 1 y 2 pp. (13-26). Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=153129924002>
- [42] HARTLE, J. (2014). “*Gravity: An introduction to Einstein’s General Relativity*”. First Edition. United States of America: Pearson Education Limited.
- [43] HAWKING, S. (1971). “*Gravitationally collapsed objects of very low mass.*”. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 152, pp. (75–78). Recuperado de: <https://doi.org/10.1093/mnras/152.1.75>
- [44] HAWKING, S Y ISRAEL, W. (1987). “*Three Hundred Years of Gravitation*”. United Kingdom: Cambridge University Press.
- [45] HAWKING, S. (2004). “*A hombros de gigantes: Las grandes obras de la física y la astronomía*”. Editor digital: Skynet
- [46] KENNEFICK, D. (2009). “*A Testing relativity from the 1919 eclipse- a question of bias.*”. Physics today, pp. (37-42). Recuperado de: <https://physicstoday.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.3099578>

- [47] KENNEFICK, D. (2019). *“No shadow of a doubt the 1919 eclipse that confirmed Einstein’s theory of relativity”*. Princeton University Press. New Jersey.
- [48] KUHN, T (1957). *“La revolución copernicana. La astronomía planetaria en el desarrollo del pensamiento occidental”*. Editor digital: Antwan.
- [49] KUHN, T (1962). *“La estructura de las revoluciones científicas”*. Fondo de Cultura Económica.
- [50] LAFUENTE, A Y ARBOLEDA, L. (1996). *“Voltaire. Elementos de la filosofía de Newton”*. Editorial Universidad del Valle.
- [51] LAPLACE, PS. (2009). *“Exposition du Système du monde”* Cambridge library collection, Cambridge University Press.
- [52] LUMINET, J. (1991). *“Agujeros negros”*. Madrid – España, Alianza Editorial.
- [53] MACÍAS, C. (2014). *“La experimentación mental en la formación de maestros de ciencias: Una alternativa para la enseñanza de la física moderna en la escuela”*. Trabajo de grado: Universidad de Antioquia, Licenciatura en física y matemáticas. Recuperado de: <http://ayura.udea.edu.co:8080/jspui/bitstream/123456789/661/1/JD0886.pdf>
- [54] MATURANA, H. (S.F). *“Emociones y lenguaje en educación y política”*. Recuperado de: https://des-juj.infod.edu.ar/sitio/upload/Maturana_Romesin_H_-_Emociones_Y_Lenguaje_En_Educacion_Y_Politica.pdf
- [55] MÈLICH, J. (2005). *“La persistencia de la metamorfosis. ensayo de una antropología pedagógica de la finitud”*. Revista educación y pedagogía. Vol. XVII, No. 42. (11-27). Recuperado de: <https://revistas.udea.edu.co/index.php/revistaeyp/article/view/6038/5444>
- [56] MICHELL, J. (1784). *“On the means discovering the distance, magnitude, of the fixed stars, in consequence of the diminution of the velocity of their light in case such a diminution should be found to take place in any of them, and such other data should be procured from observations, as would be farther necessary for that purpose”*. Philosophical transactions of the Royal Society of London. Vol. 74 pp. (35-57).

- [57] MINCIENCIAS (2022). “*Política Nacional de ciencia abierta 2022-2031*”. Bogotá, D.C. Colombia.
- [58] MINISTERIO DE EDUCACIÓN NACIONAL (2004). “*Estándares Básicos de Competencias en Ciencias Naturales y Ciencias Sociales*”. Recuperado de: https://www.mineducacion.gov.co/1759/articles-81033_archivo_pdf.pdf
- [59] NATIONAL RESEARCH COUNCIL. (2001). “*Astronomy and Astrophysics in the New Millennium*”. National Academy Press. Washington, D.C.
- [60] NAVONE, H; AQUILANO, R; MELITA, J; ET AL. (2009). “*Astrofísica escolar: Estrategias de enseñanza-aprendizaje para el nivel medio*”. Revista de enseñanza de la física. Vol 22. No. 1 pp (57-70). Recuperado de: <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/revistaEF/article/view/8021/8876>
- [61] NI, WEI-TOU. (2017). “*One hundred years of General Relativity. From genesis and empirical foundations to gravitational waves, cosmology, and quantum gravity*”. Vol. 1. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore.
- [62] OHANIAN, H Y RUFFINI, R. (2013). “*Gravitation and Spacetime*”.3rd edition. Cambridge University Press. Unites States of America.
- [63] OPPENHEIMER, R Y SNYDER, H. (1939). “*On continued gravitational contraction*”. Vol. 56, Physical Review. pp. (455-459). Recuperado de: <https://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.56.455>
- [64] OPPENHEIMER, R. Y VOLFOFF, G. (1939). “*On Massive Neutron Cores*”.Physical Review. Vol. (55) pp. (374-381). Recuperado de: <http://www.weylmann.com/oppenheimer1.pdf>
- [65] ORTIZ, E. (2017). “*Los conceptos del espacio-tiempo entre Newton y Einstein para la enseñanza de la física*”.Physical Review. Vol. (55) pp. (374-381). Recuperado de: <http://www.weylmann.com/oppenheimer1.pdf>
- [66] PAIS, A. (2005). “*Subtle is the Lord*”.Oxford University Press. New York.
- [67] PEDREROS, M., Y ZAMORA J. (2014). “*Memorias VII Congreso Nacional de Enseñanza de la Física y 1ra Escuela Latinoamericana de Enseñanza de las Ciencias y la*

- Astronomía*". Universidad Pedagógica Nacional, Universidad Distrital y Universidad Del Valle.
- [68] PEDREROS, R. (2019). "*La astronomía y su enseñanza en la educación básica y media*". Revista científica Universidad Distrital. pp. (226-233) Recuperado de: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/revcie/article/view/14494/14606>
- [69] PENROSE, R. (1969). "*Gravitational collapse: The role of general relativity*". Recuperado de: http://old.phys.huji.ac.il/~barak_kol/Courses/Black-holes/reading-papers/PenroseSing2.pdf
- [70] PENROSE, R. (2006). "*El camino a la realidad: Una guía completa de las leyes del universo*". Penguin Random House Grupo Editorial S.A
- [71] PERCY, J. R. (1998). "*Astronomy education: An international perspective. In International Astronomical Union Colloquium*" Vol. 162. pp (2-6). Cambridge University Press. Recuperado de: https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/760F90CA2CD44A5D4C864D89B7916850/S025292110011468Xa.pdf/astronomy_education_an_international_perspective.pdf
- [72] PINTO, A.C., ZANETIC, J. (1999). "*É possível levar a física quântica para o ensino médio?*" Caderno Catarinense de Ensino de Física, 16 (1), pp.7-34.
- [73] POISON, E Y WILL, C (2014). "*Gravity Newtonian, Post-Newtonian, Relativistic*" Cambridge University Press, United Kingdom.
- [74] PRIETO, A Y ORGANISTA, O. (2011). "*¿A quién se le enseña física moderna?, una mirada en instituciones educativas de Bogotá-Colombia*" Revista científica, Vol. Extra, (198-201).
- [75] SÁNCHEZ, J (1985). "*Origen y desarrollo de la relatividad*". Alianza Editorial. Madrid-España.
- [76] SÁNCHEZ, R. (2008) "*El mundo después de la revolución: La física de la segunda mitad del siglo XX*". Fronteras del conocimiento. Madrid: España pp. (63-91)

- [77] SÁNCHEZ, R. (2009) *“El jardín de Newton: La ciencia a través de su historia”*. Editor digital: Titivillus. Madrid-España.
- [78] SÁNCHEZ, R. (2015) *“Albert Einstein: Su vida, su obra y su mundo”*. Fundación BBVA. Barcelona-España. Editorial planeta
- [79] SCHWARZSCHILD, K. (1916) *“Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie”*. Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften. pp.(189-196)
- [80] SUSSKIND, L (2009). *“La guerra de los agujeros negros: Una controversia científica sobre las leyes últimas de la Naturaleza”*. Editorial digital Budapest.
- [81] TERRAZAN, E. A. (1994). *“Perspectivas para a inserção da física moderna na escola média”*. Instituto de Física e Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo.
- [82] THE EVENT HORIZON TELESCOPE COLLABORATION (2019). *“First M87 event horizon telescope results. I. The shadow of the supermassive black hole”*. The astrophysical journal letters. 875. Recuperado de: <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ab0ec7/pdf>
- [83] THORNE, K. (1994). *“Agujeros negros y tiempo curvo. El escandaloso legado de Einstein”*. Barcelona, España: Grijalbo S.A
- [84] TORRES, C. (2018). *“Aportes a la enseñanza de la física moderna desde el análisis histórico del texto original de Stephen Hawking, breve historia del tiempo: del big bang a los agujeros negros”*. Trabajo de grado de la Licenciatura en Educación Básica con Énfasis en Ciencias Naturales y Educación ambiental de la Universidad del Valle - Colombia. Recuperado de: <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/14254/CB-0597262.pdf?sequence=1>
- [85] UNESCO (2020). *“Hacia una recomendación de la UNESCO sobre la ciencia abierta”* . Recuperado de: https://en.unesco.org/sites/default/files/open_science_brochure_sp.pdf
- [86] WALD, R. (1984). *“General Relativity”*. United States of America: The University of Chicago Press.

- [87] WALSH, D; CARSWELL, R Y WEYMANN, R. (1979). “*0957+561 A, B: Twin quasi-stellar objects or gravitational lens?*”. *Nature*. 279. (pp. 381-384) Recuperado de: <https://www.nature.com/articles/279381a0>
- [88] WEINBERG, S. (1972). “*Gravitation and cosmology: Principles and applications of the General Theory of Relativity*”. United States of America: John Wiley and Sons, Inc.
- [89] WILL, C. (2018). “*Theory and experiment in gravitational physics*”. Cambridge University Press. United Kingdom.

Parte I

Anexos

Solución de Schwarzschild

Bajo las condiciones que establece Schwarzschild² se plantea un elemento de línea cuya función sea radial. Este, debe cumplir con la condición que, cuando $r \rightarrow \infty$ el espacio-tiempo sea el de Minkowski (espacio plano). Bajo estas consideraciones, se propone que:

$$ds^2 = e^{\nu(r)} dt^2 - e^{\lambda(r)} dr^2 - r^2(d\theta^2 - \sin^2 \theta d\varphi^2) \quad (5.1)$$

Teniendo en cuenta que esta solución describe el campo alrededor de una masa esférica y estática, en las ecuaciones de campo de Einstein se asume que $T_{\mu\nu} = 0$ y $R_{\mu\nu} = 0$. Con estos parámetros y resolviendo tanto los símbolos de Christoffel como el tensor de Ricci, se obtienen los siguientes componentes:

$$R_{00} = \nu'' - \frac{\nu'\lambda'}{2} + \frac{(\nu')^2}{2} + \frac{2\nu'}{r} \quad (5.2)$$

Y

$$R_{11} = \frac{1}{2}(\nu'' + \frac{(\nu')^2}{2} - \frac{\nu'\lambda'}{2} - \frac{(\lambda')^2}{2} - \frac{2\lambda'}{r}) \quad (5.3)$$

Con estos componentes y tras un tratamiento matemático se tiene que,

$$e^{\lambda(r)} = (1 - \frac{2m}{r})^{-1} \quad e^{\nu(r)} = (1 - \frac{2m}{r}) \quad (5.4)$$

Por ello, al reemplazar en el elemento de línea inicial se tiene la métrica propuesta por Schwarzschild:

$$ds^2 = (1 - \frac{2m}{r}) dt^2 - (1 - \frac{2m}{r})^{-1} dr^2 - r^2(d\theta^2 - \sin^2 \theta d\varphi^2) \quad (5.5)$$

Es importante mencionar que después de conocer esta solución, se realizaron una serie de extensiones a esta métrica que permitieron describir de forma más aproximada

²Esto puede verse en la sección 3.1.2: Renacer de las estrellas oscuras solución de Schwarzschild

el comportamiento de la singularidad física. Estas coordenadas fueron las de Kruskal-Szekeres³ y Finkelstein-Eddington⁴.

³Kruskal, M. (1960) *Maximal Extension of Schwarzschild Metric*. Physical Review. Vol.(119) pp.(1743-1745) y Szekeres, G. (1960) *On the singularities of a Riemannian Manifold*. Publicationes Mathematicae Debrecen Vol.(285)

⁴Eddington, A. (1924) *A comparison of Whitehead's formulæ*. Nature. Vol. (113) p.(192) y Finkelstein, D. (1958) *Past-Future Asymmetry of the Gravitational Field of a Point Particle* . Physical Review. Vol. (110) pp. (965-967)

Actividades propuestas para los estudiantes



Figura 5.1: Portada. Elaboración propia.

Ingrese a través del siguiente enlace: https://www.canva.com/design/DAFbt1S0t3Q/3XoHqpj0e78FPGEvDXe7_w/watch?utm_content=DAFbt1S0t3Q&utm_campaign=designshare&utm_medium=link&utm_source=publishsharelink

Introducción y contextualización:

Bienvenidos a este e-book sobre agujeros negros. De acuerdo con las indicaciones del docente, realiza las actividades que se proponen.

Actividad 1: Sobre los agujeros negros

Responde mediante clips de audio a las siguientes preguntas:

- ¿Creen ustedes que existen cuerpos invisibles en el universo? Si es así ¿cómo es posible detectarlos?
- ¿Todas las estrellas brillan e iluminan con la misma intensidad en el universo?
- Si los agujeros negros absorben la luz ¿Por qué las imágenes que se observan de agujeros negros tienen luz?
- ¿Creen ustedes que es posible que haya cuerpos de la masa del sol en el tamaño de una canica?
- ¿Cómo es posible determinar la cantidad de masa que tiene un agujero negro?
- ¿Cuáles instrumentos creen que son indispensables para la detección de los agujeros negros en el universo?

Recuerda que ...

$$M_{\text{sol}} = 1,989 \times 10^{30} \text{kg} = 1M_{\odot}$$



Sube tus audios en la
carpeta que
encontrarás aquí



Figura 5.2: Fase 1: Indagación. Elaboración propia

Actividad 2:

Socializa con tu grupo la pregunta que corresponde e ilustra la propuesta que consideres necesarias para responder a estas preguntas:

- Grupo 1: ¿Cómo identificar cuerpos invisibles u oscuros en el universo?
- Grupo 2: ¿Cómo medir la velocidad de la luz?
- Grupo 3: ¿Cómo determinar la distancia entre las estrellas y la tierra?
- Grupo 4: ¿Cómo hallar la masa de un agujero negro?
- Grupo 5: Se dice que la masa que contienen los agujeros negros es cientos de veces mayor que la del sol y está contenida en un espacio igual al de una canica ¿Cómo crees que esto es posible?



Sube la ilustración en la carpeta que encontrarás aquí:



Figura 5.3: Fase 1: Ilustraciones. Elaboración propia

Acercamiento a la física de agujeros negros:

Actividad 1: Sobre la densidad, masa, volumen y la materia en los agujeros negros.

Realiza la siguiente actividad de acuerdo con las indicaciones que se muestran a continuación:

1. Observen y manipulen los 5 pin ponos y las 3 canicas que les entregó el docente. Luego, socialicen y resuelvan las siguientes preguntas:

- ¿Qué características físicas pueden distinguir de las esferas entregadas?
- Establezca en grupo una hipótesis sobre cuáles esferas consideran que tiene mayor peso y describan los criterios que tomaron para en cuenta.
- Ordenen las esferas de menor a mayor peso y de menor a mayor volumen. Ubique en la siguiente tabla la respuesta de izquierda (el menor) a derecha (el mayor):



Variable	Número de la esfera					
	Menor masa y volumen			Mayor masa y volumen		
Masa						
Volumen						

2. Después de ordenar las esferas debatan en grupo estos interrogantes y escriban las respuestas

- ¿Qué hace que el orden entre el peso y el volumen sea diferente?
- ¿Cómo se puede calcular el valor del volumen de las esferas?
- Si los elementos no fueran esféricos ¿Cómo se puede calcular el valor del volumen de esas figuras?

Figura 5.4: Fase 2: Sobre la densidad, masa, volumen y la materia en los agujeros negros.

Elaboración propia

3. Utilizando una gramera, tome la medida de la masa de cada una de las esferas y nuevamente organícelas de menor a mayor masa:

Variable	Valor en gramos (g)							
	Menor masa				Mayor masa			
Masa de la esfera								
Número de esfera								

4. Utilizando 200ml de agua en un vaso precipitado agregue cada esfera (una por una). Posteriormente, tome la medida del desplazamiento de agua y reste con el volumen inicial para determinar el valor numérico.

Variable	Valor en mililitros (ml)							
	Menor volumen				Mayor volumen			
Volumen de la esfera								
Número de esfera								

5. En el grupo de trabajo, debata, socialice y soluciones estas preguntas:

- ¿Cuáles diferencias en la organización encontraron antes y después de pesar y hallar el valor del volumen de las esferas?
- ¿Por qué las esferas de mayor volumen NO necesariamente tienen mayor masa?
- Compare la tabla de respuestas y determine cuáles factores hacen que el orden entre ellas sea diferente.

6. Por grupo tome el algodón que se encuentra sobre la mesa, tal como se observa en la imagen:



Figura 5.5: Fase 2: Sobre la densidad, masa, volumen y la materia en los agujeros negros.

Elaboración propia

7. Luego escriban los factores que consideran claves para aumentar la densidad del algodón ¿Cómo es posible aumentar la densidad de este algodón?

8. Con el algodón que les entregó el docente, realicen una pelota compacta ¿Cuánto algodón consideran que necesita para que pese lo mismo que la esfera No 5?

- A partir de la actividad anterior ¿Cómo interpreta la densidad? ¿Qué indica la fórmula

$$\rho = \frac{m}{v} ?$$

9. Realice la siguiente lectura:

LOS AGUJEROS NEGROS

“Una de las posibilidades de la formación de un agujero negro, es a través del proceso de colapso gravitatorio que sufre una estrella masiva al finalizar su evolución estelar. Allí, la gravedad triunfa por encima de cualquier otra fuerza, haciendo que toda la materia circundante sea atraída hacia su centro. Por esta razón, las grandes concentraciones de masa (del orden de cientos de) generan campos gravitacionales tan extraordinarios que se compactan y generan mecanismos de absorción de toda la materia circundante. Por este motivo, uno de los fenómenos característicos de estas regiones es la formación de singularidades en las cuales la masa se concentra en un volumen reducido, de forma que su densidad es enorme. Por ejemplo, un agujero negro supermasivo puede contener una masa de 66,000 millones de masa solares en un volumen diminuto[1]”



[1] Es importante recordar que las singularidades son regiones dentro de los agujeros negros que se caracterizan por la presencia de enormes concentraciones de materia, en donde las magnitudes físicas tales como la densidad y la gravedad son infinitas.

Figura 5.6: Fase 2: Sobre la densidad, masa, volumen y la materia en los agujeros negros.

Actividad 2: De la gravitación y la razón por la cual los agujeros negros no emiten luz.

Realiza la siguiente actividad de acuerdo con las indicaciones que se muestran a continuación:

Estrellas oscuras y velocidad de escape

1. En cada grupo de trabajo analicen, socialicen y respondan las siguientes preguntas:



- ¿Cómo es posible que los cohetes no caigan de nuevo a la tierra?
- ¿Cuáles condiciones hacen que los cohetes salgan del planeta tierra?
- ¿Qué sucede con la velocidad de los cuerpos a medida que van subiendo?
- ¿Por qué al saltar no nos elevamos tanto? ¿Por qué no puedo salir del planeta?

2. Oprima el siguiente botón e ingresen al archivo interactivo.



3. Seleccionen la opción 1ª "¿Sabías qué?" y lea el texto propuesto
4. Comparen las respuestas de la primera pregunta y asóciénlas con la idea de Michell y Laplace.
5. Continúe en el archivo interactivo y observe los valores de la velocidad de escape de los cuerpos astronómicos.
 - Organicen las velocidades de escape de menor a mayor ¿Qué diferencias encuentran entre sus masas y radios?



Figura 5.7: Fase 2: De la gravitación y la razón por la cual los agujeros negros no emiten luz. Elaboración propia.

6. Continúe en el archivo y agregue el valor de la cantidad de masa que cree necesaria para que la velocidad de escape sea igual a la velocidad de la luz.

- ¿Cuál fue el valor de masa que agregaron?
- Socialice con los demás grupos los criterios que tomaron en cuenta para seleccionarla.

7. Observe el siguiente video sobre la velocidad de escape:



De la gravitación y la trayectoria de la luz

1. Socialice con su grupo y complete el siguiente cuadro comparativo

 <p>Ley de gravitación universal</p>	 <p>Teoría general de la relatividad</p>

Figura 5.8: Fase 2: De la gravitación y la razón por la cual los agujeros negros no emiten luz. Elaboración propia.

2. En cada grupo de trabajo analicen, socialicen y respondan las siguientes preguntas

- ¿En todos los medios se propaga de la misma manera? Justifique su respuesta.
- ¿Qué trayectoria consideras que tiene la luz cuando se propaga en el espacio?
- ¿Cuáles factores harían posible que la gravedad afecte la trayectoria de la luz?
- ¿Pueden los agujeros negros emitir luz?

3. Acompañe al docente a la simulación de la curvatura espacio-tiempo mediante una tela elástica.

4. Ubiquen en los puntos que indique el docente un par de masas y seleccione dos compañeros que se ubiquen al extremo de la tela.



5. Desde los extremos lancen sobre la tela dos canicas e intente identificar la trayectoria que toma cada una.



6. A través de la experiencia anterior, socialice en grupo estas inquietudes:

- ¿Con qué característica de los agujeros negros puede relacionar la experiencia anterior?
- ¿Por qué las canicas caen hacia la curvatura ocasionada por la esfera?
- ¿Cuáles condiciones se requieren para que las canicas logren escapar de la curvatura ocasionada por la esfera?
- ¿Cómo sería posible que las canicas no cayeran de nuevo hacia la esfera?
- Haciendo la analogía con la luz, ¿Cómo podría decirse que se mueve la luz en este caso?

Figura 5.9: Fase 2: De la gravitación y la razón por la cual los agujeros negros no emiten luz. Elaboración propia.

7. Con base en las experiencias anteriores, escriba en el siguiente cuadro los elementos las consideraciones que creen relevantes para describir la física de agujeros negros.

Agujeros negros




Actividad 3: De noticias, fotografías y premios nobel: Los agujeros negros en la actualidad

1. De acuerdo con su grupo de trabajo, abra el enlace correspondiente

Grupo 1



Mira la primera imagen del agujero negro supermasivo en nuestra galaxia

El Observatorio Europeo Austral (OEA) ha publicado la primera imagen del agujero negro supermasivo en el centro de nuestra galaxia, la Vía Láctea, conocido como Sagitario A* (Sgr A*).

© ESO / M. Kornmesser

Grupo 2



Qué es la singularidad, el corazón de los agujeros negros donde se rompen todas las leyes conocidas de la naturaleza

Este martes, la Real Academia de las Ciencias de Suecia otorgó el premio Nobel de Física a los físicos que a lo largo de los años se han dedicado a estudiar los agujeros negros, su nacimiento y el comportamiento extraño de uno de ellos.

© BBC News Mundo / 10 de octubre de 2020

Grupo 3



Cómo surgen los agujeros negros más grandes del universo

Se cree que millones de veces más grandes que nuestro Sol, pero poco se sabe sobre cómo estos monstruos se forman y llegan a estar en su tamaño. Un equipo internacional de físicos ha estado estudiando cómo se forman los agujeros negros más grandes del universo.

© BBC News Mundo / 10 de octubre de 2020

Grupo 4



Científicos presencian la agotación de una estrella gigante por primera vez

Los telescopios terrestres prepararon la primera mirada en tiempo real a la agotación de una estrella supergigante roja.

© CNN / 10 de octubre de 2020

Grupo 5



La primera imagen de Sagitario A*, el monstruoso agujero negro en el centro de nuestra galaxia

Durante décadas, los astrónomos especularon lo que había en el centro de la Vía Láctea. Con esta imagen que logró una colaboración internacional, ya no quedan dudas.

© BBC News Mundo / 10 de octubre de 2020

Figura 5.10: Fase 2: De noticias, fotografías y premios nobel: Los agujeros negros en la actualidad. Elaboración propia.

2. Haga click sobre la imagen. De acuerdo con la lectura de cada noticia, discuta con su grupo y responda las preguntas que se proponen allí.

**De noticias, fotografías y premios nobel:
Los agujeros negros en la actualidad...**
Con base en la interpretación realizada del texto periodístico, debatir y responder las siguientes preguntas:

Preguntas:

1. ¿Qué conceptos físicos se relacionan con la noticia leída?
2. De estos conceptos que resaltan ¿Cuáles creen relevantes para hablar de los agujeros negros?
3. En las noticias se hace alusión directa a la relatividad general, sin embargo, ¿Cómo se explican los agujeros negros a través

3. Haga click sobre la imagen. Observe los clips de video, socialice y escriba sus respuestas en el Padlet:

**De noticias, fotografías y premios nobel:
Los agujeros negros en la actualidad.**
A través de los fragmentos observados de los videos propuestos, socialice y respondan las siguientes preguntas:

Un viaje al infinito (Netflix):

- (34:40min- 38:50min) ¿Cómo es posible concebir una curvatura y una densidad infinitas?
- (40:21min- 40:40min) ¿Qué considero de la afirmación realizada por el filósofo Kenny Easwaran) sobre la posibilidad de tener

Agujeros negros: Al límite del conocimiento (Netflix)

- (56:45min- 57:20min) ¿Por qué se mueven las estrellas más cercanas a los agujeros negros con mayor velocidad?
- ¿Qué aspectos p resaltar del trabajo para la detección de

Figura 5.11: Fase 2: De noticias, fotografías y premios nobel: Los agujeros negros en la actualidad. Elaboración propia.