

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL.

Facultad de Ciencia y Tecnología

Departamento de Física

Trabajo de Grado:

UN ESTUDIO CUALITATIVO DEL CAMBIO DE PARADIGMA DE LA
TERMODINÁMICA DE AGUJEROS NEGROS

Documento para optar por el título de: Licenciada en Física.

Autora: LUCIA BARRETO ARIAS

Dirigido por: YESID JAVIER CRUZ BONILLA

Bogotá D.C. Agosto 17 de 2021

AGRADECIMIENTOS

Esto está dedicado a mis Padres Marlén y Luis que jamás me abandonaron y fueron un apoyo constante e incansable en esta empresa y con los cuales estaré eternamente agradecida por su amor incondicional y sus enseñanzas, a mis Abuelitas Mery y Nohora que con su amor y sabiduría me han acompañado y criado y me daban ánimos para seguir y a mi Abuelito Jaime que a pesar de que ya partió me apoyo desde su amor y me gustaría que estuviese en este momento. A Andrés por ser ese compañero que ha sido un soporte moral durante todo este tiempo y al cual le correspondo su amor, su paciencia y su comprensión, y mis amigos María Luisa y Miguel por estar ahí impulsándome.

También a todos los profesores que han marcado mi vida como lo son Miguel Rodríguez, Zamar y de los cuales aprendí mucho más allá de lo visto en clase, a la Profesora Rusby Malagón que me apoyo a pesar de las circunstancias y al Profesor Yesid Cruz por aceptarme y apoyar e impulsar esta idea.

1	INTRODUCCIÓN.....	4
2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
3	OBJETIVOS.....	6
3.1	OBJETIVO GENERAL.....	6
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
4	REFERENTES.....	6
4.1	ANTECEDENTES.....	6
4.2	CONTEXTUALIZACIÓN HISTÓRICA Y CONCEPTUAL.....	8
4.2.1	MARCO TEÓRICO DISCIPLINAR.....	8
4.2.1.1	Breve historia de la termodinámica.....	8
4.2.1.2	Teoría de la información.....	19
4.2.1.3	Introducción a la historia de la relatividad general.....	20
4.2.1.4	Historia de la termodinámica de agujeros negros.....	25
4.2.2	MARCO TEÓRICO METODOLÓGICO.....	26
4.2.2.1	Sobre los cambios de paradigma.....	26
4.2.2.2	Sobre la metacognición.....	27
5	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	29
5.1	COMPONENTE METODOLÓGICO.....	29
5.2	COMPONENTE DISCIPLINAR.....	32
6	CONCLUSIONES.....	41
7	BIBLIOGRAFÍA.....	42

1 INTRODUCCIÓN.

La termodinámica de agujeros negros lleva por lo menos unos sesenta años en la física y aún falta mucho por entender y descubrir, este trabajo quiere sumarse en esta profundización, tiene un enfoque disciplinar y busca una comprensión conceptual más que ser un listado de demostraciones matemáticas.

En este documento el objetivo es encontrar el cambio de paradigma de la termodinámica de los agujeros negros y se hace un recuento histórico y conceptual desde la termodinámica clásica hasta la termodinámica de agujeros negros pasando en medio por la teoría de la información, y la relatividad general, también se hace un abordaje sobre los cambios de paradigma y la metacognición., por lo tanto este trabajo se divide en cuatro apartados los cuales son: PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA donde se establece el problema y el por qué hay que ahondar en este, el segundo apartado llamado REFERENTES es donde se encuentra todo el trasfondo histórico y conceptual tanto en antecedentes y el marco teórico, luego está el apartado llamado DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN donde se especifica la metodología y se hace el desarrollo de la búsqueda del cambio de paradigma y por último están las CONCLUSIONES donde se cierra la investigación.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

La forma como se ha construido el conocimiento humano ha traído consigo un aumento de conocimientos que ha implicado una especialización en cada temática que se ha ido descubriendo y esto a su vez en la especialización de esta temática nueva y así sigue esta dinámica hasta que se llegan a disciplinas tan diferentes entre sí que solo tienen en común una raíz epistemológica lejana.

Esto conlleva a que la cantidad de contenido que se debe “aprender” durante el transcurso de lo que se conoce como pregrado (en especial los de física) no se logre abarcar en su totalidad, en el aula en especial las aplicaciones modernas o las perspectivas de la gran mayoría de teorías y conceptos que son de gran importancia para el estudio de la física actual, como es el caso de la mecánica estadística, donde se hace un estudio desde la termodinámica clásica bajo una visión atomista y posteriormente bajo la visión de la mecánica cuántica, por poner un ejemplo.

Por lo tanto, para el estudiante de pregrado es importante plantearse la idea de abordar temas recientes de la física para este caso la termodinámica de agujeros negros que obligan a tener un manejo sistémico del conocimiento de las diferentes ramas de la física, tanto del aspecto clásico como del moderno para tener una comprensión básica de este tema, en el aspecto clásico se debe abordar a la termodinámica clásica pero no solo a esta como área de estudio sino también como cambió al ser aplicada a un contexto moderno que está fuera de las condiciones “normales” en las que se estudia.

La termodinámica de agujeros negros es una rama de la física relativamente reciente ya que fue planteada entre los años sesenta y setenta por las contribuciones de Stephen Hawking y otros científicos como Bardeen, Carter, Bekenstein, Christodoulou, Penrose y Smarr solo por nombrar algunos, sobre los estudios de la interpretación microscópica de la entropía y la evaporación de agujeros negros mediante la radiación de Hawking, principalmente a estos aportes se le suman los hechos por otros científicos de la época, como el límite de entropía que Bekenstein formulo. Teorías como el principio holográfico donde se expresa que las superficies de los agujeros negros contienen la información de su “contenido” y que la proyección de esa información en el horizonte cósmico da como resultado un holograma de nuestro universo como respuesta a la paradoja de la información; esta temática es un buen ejemplo de teorías que se basan en este análisis sobre la naturaleza termodinámica de los agujeros negros.

Según lo planteado por Thomas Kuhn en su trabajo sobre el desarrollo de las teorías científicas las teorías evolucionan y cambian de perspectiva según la investigación que se ha hecho y se produce crisis en la ciencia normal, algunas teorías dejan de ser la generalidad y se convierten en casos especiales de otras, hay otras que debido a su insuficiencia dejan de ser “validas” y así sigue la dinámica del conocimiento científico, (Kuhn, 1992) por lo tanto como pasa con las teorías en las que se encuentran ubicados, los conceptos también varían a medida que estas dinámicas se dan, ahí es donde se ve la necesidad de estudiar las propiedades termodinámicas de los agujeros negros ya que observar el cambio de los conceptos o las nuevas aplicaciones o correlaciones con otros permite que generar un mejor aprendizaje de esta temática.

Por lo tanto, la pregunta problema a resolver es:

¿Cuál es el cambio de paradigma de la termodinámica clásica para el estudio o comprensión de los agujeros negros?

3 OBJETIVOS.

3.1 OBJETIVO GENERAL.

Evidenciar las relaciones entre las leyes de la termodinámica clásica y la termodinámica de agujeros negros, que conllevaron al cambio de paradigma de la termodinámica clásica en el estudio de los agujeros negros.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Contextualizar histórica y conceptualmente los principios y leyes relacionados con la termodinámica clásica y la relatividad general, que sufrieron un posterior cambio al introducirlos en la astronomía moderna.
- Usar el ejercicio metacognitivo como herramienta en la comprensión conceptual para poder determinar el cambio de paradigma.
- Determinar a partir de los estudios anteriores el cambio de paradigma que se dio en la termodinámica clásica.

4 REFERENTES

4.1 ANTECEDENTES.

Este trabajo tiene un propósito, el cual es el entendimiento del cambio de paradigma de la termodinámica de agujeros negros, y por lo tanto los antecedentes en el área son prácticamente inexistentes ya que estas analogías con la termodinámica clásica son dadas por sentado, y no es común el estudio a nivel epistemológico, lo que es fundamental para su comprensión profunda.

Esto conlleva a que los antecedentes sean en su mayoría a nivel disciplinar, los cuales se escogieron por su estudio de la termodinámica de agujeros negros y de alguna de las ramas de la física abordadas en este trabajo, así que se presentan tres antecedentes disciplinares: uno local, uno nacional y uno global.

Título, año e institución	Autor	Temática
<p>TERMODINÁMICA DE AGUJEROS NEGROS. Introducción a la concepción de entropía de acuerdo con la segunda ley generalizada</p> <p>2014</p> <p>Universidad Pedagógica Nacional.</p> <p>Antecedente Local</p>	<p>Juan Sebastián Arenas Hoyos</p>	<p>En este trabajo de grado el autor hace un recorrido conceptual desde la solución de Schwarzschild pasando por las soluciones de Reissner- Nördstrom, Kerr, y Kerr-Newman, luego por la termodinámica de agujeros negros, la radiación de Hawking y por la generalización de la segunda ley.</p> <p>Las conclusiones que hace el trabajo hablan sobre la sencillez de los agujeros negros al ser caracterizados únicamente por tres variables y que estos tienen asociadas unas leyes termodinámicas.</p> <p>La verdadera naturaleza de la relación de estas leyes con las leyes de la termodinámica clásica requiere una teoría de gravedad cuántica y un estudio completamente cuántico, para que pueda ser develada.</p>
<p>Termodinámica de agujeros negros y la teoría de la información.</p> <p>2007</p> <p>Universidad de los Andes.</p> <p>Antecedente Nacional</p>	<p>Luis Aníbal García López.</p>	<p>También hace un recuento teórico desde la relatividad general pasando por las soluciones de Schwarzschild, Kerr, Kerr-Newman, por la termodinámica de agujeros negros, la radiación de Hawking y sobre el problema de la información que se pierde del agujero negro.</p> <p>Las conclusiones del trabajo se encaminan en la relación entre la entropía del agujero negro y la teoría de la información y cómo estos estudios resultan en una gravedad cuántica como teoría última, y la solución de la paradoja de la información mediante una teoría de la información cuántica</p>
<p>Teorías de gravedad, propiedades termodinámicas irreversibles</p> <p>2010</p> <p>Universidad de Buenos Aires</p> <p>Antecedente Global</p>	<p>Matías Aiello</p> <p>*Tesis de doctorado</p>	<p>En este caso el autor busca trabajar las leyes de la termodinámica de agujeros negros en una de las soluciones de las ecuaciones de campo de Einstein, llamada la solución de Gauss-Bonnet con diferentes cargas, esta solución está basada en una teoría electromagnética no lineal, al tratar las leyes de la termodinámica de agujeros negros aborda el tema de procesos no reversibles.</p> <p>Busca finalmente tratar la termodinámica de manera exclusivamente matemática desligándola de la flecha del tiempo a la cual se la asocia.</p>

Tabla 1 Antecedentes disciplinares

A nivel metodológico sobre el ejercicio metacognitivo se tiene el siguiente antecedente el cual sirvió para tomar las etapas de este.

<p>Análisis metacognitivo en el estudiante de básica durante la resolución de dos situaciones experimentales en la clase de ciencias naturales.</p> <p>2019</p> <p>Universidad Pedagógica Nacional</p> <p>Antecedente Local.</p>	<p>Oscar Tamayo. Valentina Cadavid. Diana Londoño.</p>	<p>Mediante una red semántica se muestran los resultados de un análisis sobre los procesos metacognitivos de estudiantes de 10 a 12 años ante experiencias de fenómenos como los son la combustión y un péndulo simple, en el estudio se presentó un análisis de cada etapa del proceso donde se tomaron datos antes y después de las experiencias, llegando a la conclusión de la falta de secuencialidad en la abstracción de fenómenos.</p> <p>Es una especificación de los procesos metacognitivos en los cuales se basará la metodología de esta investigación.</p>
---	--	--

Tabla 2 Antecedente metodológico

4.2 CONTEXTUALIZACIÓN HISTÓRICA Y CONCEPTUAL

4.2.1 MARCO TEÓRICO DISCIPLINAR.

4.2.1.1 Breve historia de la termodinámica.

Como algunas de las ramas de la física clásica las preguntas sobre los fenómenos resultaron de la experiencia con el mundo que rodeaba al humano primitivo; en el caso de lo que ahora llamamos termodinámica, vendría siendo las sensaciones de frío y calor que eran respuesta a la exposición a condiciones tanto creadas como naturales como el fuego, o la lluvia, o el hielo por lo tanto, el estudio de la termodinámica empezó antes de que se le diera un nombre formal; la fabricación de ropa para protegerse del frío y a su vez el uso del fuego para calentarse son indicios de conocimientos de qué materiales son aislantes térmicos y cómo crear una combustión para calentar un espacio; en resumen a este se le puede llamar el inicio de la termodinámica. El primer tratado sobre la termodinámica, aunque no se le llamara así, fue publicado por Herón de Alejandría este se llama *Pneumatica*, aunque no se tiene precisión de en qué época vivió y en qué momento lo escribió, Herón trabajo sobre la presión atmosférica, fenómenos de transferencia del calor y algunos diseños ingenieriles, como la Eolipila. (Gamow, 2010)

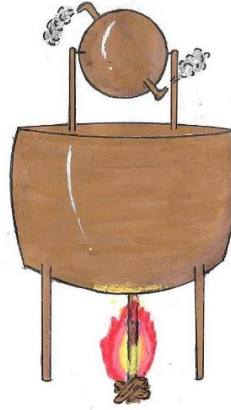


Ilustración 1 Eolipila de Herón Dibujado por la autora

También hubo experimentaciones por parte de Hipócrates y de Klaudios Galenos, que relacionan la temperatura de los cuerpos humanos con los medicamentos capaces de curarlos y hasta con la personalidad, en la época de Galenos el objeto más frío era el hielo y el más caliente era el agua hirviendo, aunque creo que era porque no podían tener la medida de un termómetro ya que como se sabe actualmente gracias a ese instrumento que cualquier metal al rojo vivo es mucho más “caliente” y en esa época ya había fundición de metales. Gracias a toda esta experimentación se funda una primera escala de medida de temperatura algo arbitraria donde el patrón de medida era una mezcla de iguales partes de agua hirviendo y hielo, llamada la *sustancia neutral*, esta escala constaba de nueve grados, cuatro grados por encima de la sustancia neutral y cuatro grados por debajo. Esta forma de medida se usó por la edad media hasta la invención del termómetro. (Müller, 2007)

Según (Müller, 2007) no fue hasta el siglo XVIII donde Celsius y Fahrenheit formularon las escalas de medida más usadas antes de la escala Kelvin; hubo una temporada donde hubo hasta 18 escalas de medición de temperatura, las escalas Celsius y Fahrenheit fueron las que mejor especificaban las medidas y la transformación entre ambas era de las más sencillas por eso sobrevivieron hasta la actualidad, la escala Kelvin fue instaurada tiempo después como una escala absoluta.

En cuestión de leyes, experimentación “formal” y matematización es hasta finales del siglo XVI cuando Galileo inventa el termoscopio, objeto el cual servía para poder evidenciar la dilatación, de los cuerpos como consecuencia de los cambios de temperatura. Muestra que la temperatura que percibimos con el tacto depende de las condiciones ambientales.

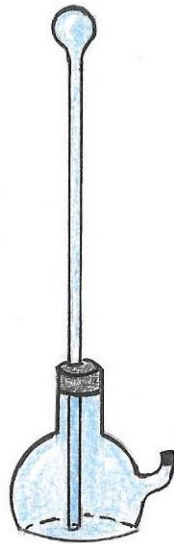


Ilustración 2 Termoscopio de Galileo Galilei Dibujado por la autora

(Gamow, 2010) indica que 48 años después en la Academia Lincei se inventa el termómetro de mercurio que se conoce en la actualidad.

Asociada al termómetro está la conocida **ley cero de la termodinámica** o también ley del equilibrio térmico, la cual indica que:

Si los cuerpos por separado A y B están en un equilibrio térmico con un tercer cuerpo C, entonces los cuerpos A y B están en equilibrio térmico entre sí (Serway, 1985)

Aunque la formulación de esta ley es de origen desconocido, se sabe que fue formulada después de las ya existentes leyes primera y segunda, por eso su nombre de ley cero, ya que trataba de una conceptualización previa y más básica.

Esto quiere decir que el instrumento de medida para determinar si el sistema AB está en equilibrio térmico es el cuerpo C, el cuerpo C es un termómetro ya que está midiendo temperatura. Esta ley es producto de la experiencia con la cotidianidad; la invención y el uso del termómetro solo permitió corroborarla. Estas leyes tienen el nombre de *leyes empíricas*, y en el desarrollo de la termodinámica se presentaron varias.

Torricelli inventa el primer barómetro en 1644, siendo ya con este el segundo instrumento de medida que cuantificaba las *variables macroscópicas*, el primero sería el termómetro que mide la temperatura y el segundo es el barómetro cuya función es medir la presión. (Gamow, 2010)

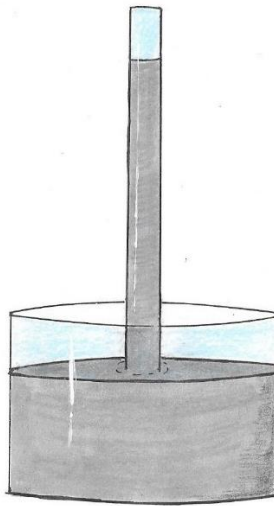


Ilustración 3 Barómetro de Bernoulli Dibujado por la autora

Boyle en 1676 a partir del estudio de la campana de vacío de Otto van Guericke (1654) produce la famosa ley de:

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

Que implica que la relación en un sistema cerrado entre presión y volumen es constante si la temperatura se mantiene invariable, se le llama proceso isotérmico. (Gamow, 2010)

A mediados del siglo XVIII se inicia la revolución industrial con la introducción de la máquina de vapor a los procesos industriales, al ir experimentando y mejorando la máquina se producen otras deducciones sobre las relaciones entre las variables macroscópicas, como por ejemplo la hecha por Charles (1787) y Gay Lussac donde hay una proporcionalidad directa entre la temperatura y el volumen (proceso isobárico); también lo que se llamó la primera ley de Gay Lussac (1802) donde la relación entre la presión y la temperatura (proceso isocórico) al igual que para la ley de Charles es directamente proporcional, y otra relación directamente proporcional es la hecha por Avogadro en 1811 donde relaciona la cantidad de sustancia y el volumen. (Gamow, 2010)

La unificación de las leyes da como resultado la ley de los gases ideales. Que hace referencia a un gas a presión de una atmosfera (1 atm), a 25°C, y sin interacción entre las partículas. La

mayoría que de los gases se comporta de esta forma a unas condiciones específicas para cada uno. (Müller, 2007)

Lavoisier el reconocido químico es aquel que formula la *teoría del calórico* esto implica que le da propiedades materiales al calor, por lo tanto, se consideraba al calor como un fluido que va de los cuerpos más calientes a los más fríos. Joseph Black que también se dedicaba al estudio de la transferencia de calor de un cuerpo a otro notó que cuando el hielo se calienta lentamente, se derrite pero mantiene su temperatura, a este concepto se le llamó después *calor latente*, también mediante otros experimentos se dio cuenta que cuerpos en igual cantidad de sustancia pero de diferente material tenían cantidades de “calórico” diferentes, a este fenómeno se le conocería luego como *capacidad calorífica*; a finales de siglo Benjamin Thompson también conocido como Conde de Rumford plantea que el calor es la energía del movimiento de las partículas que componen las sustancias, esto surge debido a que cuando supervisaba una construcción se da cuenta que un taladro de punta roma se calentaba más que uno bien afilado, al seguir observando se dio cuenta que el calórico producido en la manipulación del taladro debió ser lo suficiente como para derretirlo, pero no fue así, lo que implicaría que la teoría del calórico tenía sus fallas, uno de los experimentos que usó para poner a prueba la teoría del calórico fue cuando pesó una cantidad de agua en estado líquido y en estado sólido y comprobar que pesaban lo mismo. (Müller, 2007)

A pesar de estos descubrimientos hechos por von Rumford no se desecha la teoría del calórico hasta mediados del siglo XIX cuando Mayer, Joule y von Helmholtz con sus deducciones y experimentaciones sacan lo que sería la base de la primera ley de la termodinámica, donde el calor es otro tipo de energía. Faltaría que Clausius en ese mismo siglo finalizara lo que conocemos hoy en día. (Müller, 2007)

El concepto de energía fue acuñado por Young en 1807, lo toma de la palabra griega *ἐνεργία* cuya traducción es eficacia o fuerza efectiva; pero no fue hasta medio siglo después que se aceptó su uso por parte de la comunidad científica, ya que tenía extrapolaciones tanto con la mecánica, energía térmica y la energía electromagnética. A pesar de que se había inventado este término, personajes como Mayer, Joule y von Helmholtz usaban el término fuerza viva para hablar de la energía cinética. (Müller, 2007)

Mayer formula en 1842 que el trabajo está relacionado con el calor mediante el enunciado “*movimiento es calor*”, por lo tanto, eso traduce que el trabajo es el equivalente mecánico del calor y gracias al experimento de Joule un año después puede encontrar la equivalencia matemática entre el trabajo mecánico y el calor, mediante un aparato que el mismo fabricó. A esta conclusión llega también von Helmholtz basándose en los trabajos de Joule, la diferencia de von Helmholtz es que adicional de que el movimiento es calor, formula la idea de que las colisiones y la fricción hacen que se reduzca la energía cinética, y que la energía se redistribuya a las partes microscópicas del sistema. Aquí surge la **primera ley de la termodinámica**. Pero por el momento era un enunciado no es hasta que Clausius lo formaliza matemáticamente en la segunda mitad del siglo XIX. (Müller, 2007)

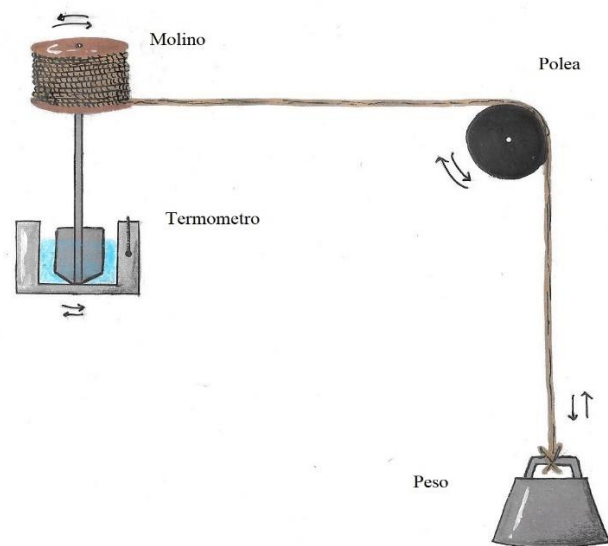


Ilustración 4 Experimento de Joule dibujado por la autora

Clausius realiza una demostración matemática donde no solo el calor está estrechamente relacionado con el trabajo sino también surge el concepto de energía interna denotado como U todo esto con la finalidad de encontrar la función de Carnot para el ciclo con el mismo nombre.

$$\Delta Q = \Delta U + W$$

Donde ΔU es la variación de la energía interna la cual sigue la ley de conservación de la energía, es la suma de las energías cinéticas de las partículas y la energía potencial de las interacciones entre ellas; Q es el calor, W es el trabajo mecánico hecho por el sistema.

Dependiendo desde el punto de referencia de donde se haga el trabajo, si es hecho por el sistema o hacia el sistema, el signo de la suma será negativo o positivo. Sin embargo, esta ley se aplica a sistemas cerrados y queda con el enunciado “*El trabajo es el equivalente mecánico del calor*”. (Müller, 2007)

Esta ley es una ley conservativa, ya sea en el caso donde se usa la energía interna o la entalpía; esto quiere decir que es la aplicación de la conservación de la energía mecánica al caso termodinámico, con las ya nombradas variables termodinámicas.

Con el desarrollo de variaciones de la máquina de vapor se buscaba solucionar el problema de la eficiencia del aparato, para que la inversión en materia prima y energía fuese mínima respecto a la energía transformada por la máquina. Clausius, Kelvin y Carnot al estudiar los procesos realizados por la máquina de vapor observaron que había una parte del calor que se disipaba esto implicaba que a la hora de transformar el calor en trabajo parte del calor se perdía de forma irremediable, mientras que si se transformaba el trabajo en calor este proceso es totalmente eficiente. Adicionalmente llegan a la conclusión de que para que se haga un trabajo el calor no “fluye” por sí solo de un lugar a otro, sino que requiere que una parte del calor se “pierda” con el fin de darle impulso a la máquina sea cual sea, para que se dé ese flujo es necesario que haya lo que Carnot llama una caída de temperatura para que el calor fluya de un punto del proceso a otro y para que la maquina funcione debe usarse un porcentaje del calor en esa tarea, haciendo que ni la máquina más ideal tenga una eficiencia del 100% (Gamow, 2010). Ese calor no aprovechado dividido por la diferencia de las temperaturas al inicio y final del proceso es el primer concepto de entropía que se tiene, al cual también llegó Clausius en su trabajo de determinar la eficiencia del ciclo de Carnot, llego a la conclusión de que no todos los ciclos ni procesos son reversibles sino en unas condiciones muy específicas, por su parte los procesos irreversibles evidencian más esta condición de disipación de energía. Es Clausius el que le da nombre a esta propiedad la conocida **Entropía**, denotada con la letra **S** que viene de la palabra griega τροπή que traduce transformación y cambio. (Müller, 2007)

Por lo tanto, Clausius es quien formula la **segunda ley de la termodinámica** a partir de los estudios sobre las eficiencias de los motores dando la siguiente expresión

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

Esta ley se describe por Carnot, de la siguiente manera “*El calor no puede pasar por sí mismo de un cuerpo frío a uno caliente*”. (Müller, 2007)

Cuando Clausius hace sus estudios sobre los motores y los ciclos, era reciente la teoría atómica postulada por Dalton a inicios del siglo XIX, con la cual se puede decir que retoma el trabajo de Leucipo y Demócrito, y la cual fue bastante aceptada por parte de los químicos pero no tanto por los físicos de la época. Cuando Clausius formula la primera ley y la segunda tiene en cuenta que los calores específicos y las capacidades caloríficas varían en términos de los coeficientes dependiendo si se tratan de gases monoatómicos o diatómicos, etc. Otro fundamento previo que tuvo Clausius aparte de la teoría atómica fue la teoría cinética de los gases, la cual se le atribuye a Daniel Bernoulli en el siglo XVIII, donde se les daban características estadísticas a los gases y con estas características se analizaron macroscópicamente los sistemas que ya en la época se consideraban compuestos por muchas partículas. (Müller, 2007)

Después de esta inferencia se tiene la interpretación hecha por Boltzmann, la cual no fue muy aceptada en su época, aunque para llegar a ella tuvo unos pasos previos que dar como la formulación de una distribución de energía y velocidades de las partículas, que hizo en conjunto con Maxwell y donde se evidencia su tratamiento probabilístico a la hora de analizar sistemas termodinámicos. La estadística es la lupa con la que estudia las variables termodinámicas de cada sistema y mediante ella es como llega a la famosa versión probabilística de la entropía, donde se tiene en cuenta la distribución; la cantidad de posibles combinaciones de las partículas es simbolizada con la letra griega ω , y al estudiar esta cantidad de posibles estados a medida que el sistema evoluciona termina comprobando que la entropía de un sistema solo puede crecer ya que es la forma como llega al equilibrio; esto implica que las distribuciones de partículas cuyas probabilidades son altas son a las cuales va a tender el sistema y por lo tanto son las de mayor entropía. (Müller, 2007)

$$S = k \ln \omega$$

Esta interpretación que tiene cuenta el azar de los movimientos de las partículas y la imposibilidad de individualizarlas da paso lo que se llama la mecánica estadística y por lo tanto la conceptualización determinística de la época dejó de ser la regla a la hora de entender estos sistemas

Tiempo después de todo esto hay una formulación a la que llega Nernst el cual se puso a teorizar sobre la entropía de las estructuras cristalinas, llega a la conclusión que cuando los sistemas llegan a muy bajas temperaturas, la entropía se reducía mucho ya que los sistemas tienen menos energía y por lo tanto menos probables distribuciones, lo que implica que si la temperatura tiende al **cero absoluto** la entropía también lo hará. A partir de esto se deduce la **tercera ley de la termodinámica**: “Las entropías de diferentes fases de un cuerpo cristalino se vuelven iguales para $T \rightarrow 0$, sin importar la estructura de red, adicionalmente que son independientes de la presión.” En 1912, Nernst añade tres consideraciones sobre lo anterior de donde surge la tercera ley como la conocemos en los libros de texto actualmente (Müller, 2007):

- “Es imposible construir un motor que produzca calor o trabajo de la nada”
- “Es imposible construir un motor que produzca trabajo de nada más que el calor del ambiente”
- “Es imposible quitar todo el calor de un cuerpo”

A finales del siglo XIX Kirchoff concibe el cuerpo negro que tiene la capacidad de absorber y emitir todas las frecuencias de la radiación, pero que no puede reflejar ninguna, por esta razón sería negro, este fenómeno es independiente del material del cual estuviese hecho; ahora se tiene también que un cuerpo negro es un orificio en un objeto hueco por el cual solo puede salir una parte muy pequeña de la radiación que es absorbida por las paredes del interior de la cavidad, se sabe gracias a la teoría electromagnética que la velocidad de una onda electromagnética en el vacío es su frecuencia por su longitud de onda y que esta velocidad es una constante, por lo tanto la relación entre la frecuencia y la longitud de onda es inversamente proporcional. Se sabe también que cuando un cuerpo emite radiación térmica lo hace en las franjas del infrarrojo, la luz visible y el ultravioleta. (Müller, 2007)

Para estudiar el cuerpo negro y radiación que este emite se hace mediante la variable *densidad de energía* (ρ) que en este caso se estudia en función de frecuencia ($\rho(\nu)$), la cual refleja que la energía que absorbe el cuerpo negro debe ser la misma que emite y ambas deben estar a la misma temperatura, lo que implica que si la energía aumenta lo hará la densidad de la misma y también la temperatura aumentará, Josef Stefan encuentra la relación entre la densidad de energía y temperatura siendo esta última elevada a la cuarta potencia, la relación entre ambas es de proporcionalidad. (García Castañeda & Ewert De-Geus, 2008)

Boltzmann que fue alumno de Stefan en 1878, quiso comprobar dicha proporcionalidad, así que usó la ecuación de Gibbs para completar esa tarea, llegando a esta expresión la cual se conoce como la *ley de Stefan-Boltzmann*. (García Castañeda & Ewert De-Geus, 2008)

$$d(\ln q) = 4 d(\ln T)$$

Cuando se realizan las gráficas experimentales que muestran el comportamiento de la radiación de cuerpo negro teniendo como variable independiente la frecuencia (ν) y como variable dependiente la densidad de energía ($q(\nu)$) se obtiene la siguiente representación.

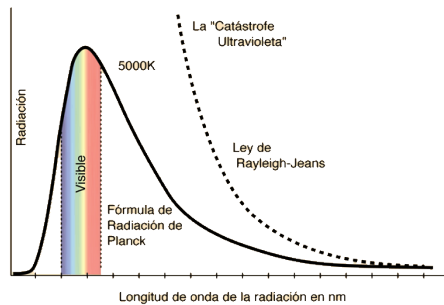


Ilustración 5 Gráfica de la relación entre la densidad de energía y la longitud de onda emitida por un cuerpo negro Copyright por HyperPhysics.

A partir de estudiar la gráfica llega Wilhelm Wien, y nota que para diferentes temperaturas y frecuencias las densidades de energía para cada curva varían de tal forma que a mayor temperatura y densidad de energía se desplaza hacia frecuencias más altas, por lo tanto, a esa ley se le llamó la *ley de desplazamiento de Wien*. En 1893 Wien encuentra una relación para la densidad de energía y la frecuencia para una temperatura dada mediante la ecuación (García Castañeda & Ewert De-Geus, 2008):

$$q(\nu) = \frac{c_1 \nu^3}{e \frac{c_2 \nu}{T}}$$

Donde las constantes c_1 y c_2 son constantes de ajuste, para que las gráficas experimentales y teóricas coincidan, aunque esta ley solo funciona para frecuencias bajas.

Tiempo después Rayleigh y Jeans se basan en la falencia de ley de Wien y buscan completar la ley así que formulan una ley de la forma, $q(\nu) = \frac{8\pi}{c^3} k_b T \nu^2$ pero esta fórmula tampoco funciona ya que daría densidades de energía exageradas con respecto a las frecuencias con las que están relacionadas lo que implicaría energía infinita y esto viola el principio de la

conservación de la energía esto se le llamó la Catástrofe del Ultravioleta y se le llamó así debido a que, a partir de la región del ultravioleta, los valores que toma teóricamente la densidad de energía no corresponden a los tomados experimentalmente. (García Castañeda & Ewert De-Geus, 2008)

Por lo tanto se tenían dos leyes que explicaban el funcionamiento de la radiación de cuerpo negro pero en zonas diferentes del espectro electromagnético, entonces era una teoría incompleta pero en 1900 llega Planck a explicar mediante un forma totalmente revolucionaria dicho fenómeno, desde antes se consideraban a los electrones del material del que estaba compuesto el cuerpo negro como osciladores armónicos que vibran en la misma frecuencia de la onda que irradia el cuerpo negro además se supone que debido al principio de equipartición de energía postulado por Boltzmann todos tienen una energía promedio; algo con lo que no estuvo de acuerdo Planck que tuvo la idea de que esta energía no estuviese igualmente repartida entre los electrones sino que cada uno tuviese una energía diferente pero esto también implica que las frecuencias de emisión eran diferentes entre sí y podría ser la razón por la que observara un espectro continuo. Ahora Planck parte de dos postulados para formular la nueva explicación. (García Castañeda & Ewert De-Geus, 2008)

- El oscilador solo puede tener valores enteros para la energía dados por $\varepsilon = n\varepsilon_0$ donde n es el número cuántico y ε las energías se llaman estados cuánticos.
- El oscilador emite o absorbe radiación en cantidades discretas llamadas cuantos (actualmente se les llaman fotones) por lo tanto cuando el electrón absorbe o emite energía hace “saltos” entre los estados.

Cuando Planck halla la energía del oscilador, se puede calcular la densidad de energía que está dada por:

$$\varepsilon_n = n\varepsilon_0$$

Donde n son números enteros positivos, tal que $n \in \mathbb{N}$, a partir de esto llega a la expresión que recoge las leyes de Wien y Rayleigh-Jeans y también tiene en cuenta las ecuaciones de Stefan-Boltzmann y la ley de desplazamiento de Wien. A partir de esto se puede determinar la energía promedio y por lo tanto la densidad de energía, respectivamente.

$$\bar{\epsilon} = \frac{\epsilon_0}{e^{(\epsilon_0/kT)} - 1}$$

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{\epsilon_0}{e^{\epsilon_0/kT} - 1}$$

Luego de una sustitución llega a la ecuación que fue tan importante

$$\epsilon_0 = h\nu$$

Donde h es la constante de Planck de valor 3.82×10^{-19} J y ν es la frecuencia de la onda a la cual se le quiere calcular la energía. Esta conceptualización rompió con la forma de pensar y crea un nuevo paradigma en la física llamado mecánica cuántica. (García Castañeda & Ewert De-Geus, 2008)

4.2.1.2 Teoría de la información.

Recientemente se habla más de información porque estamos en una era digital que ha crecido exponencialmente, inclusive más rápido que la primera revolución industrial que produjo la humanidad, pero el tema de la información de hecho no es nuevo, ha sido un elemento importante desde que la vida existe y permitió su evolución, la información es un elemento que no solo se restringe a los asuntos digitales y a la computación, todo lo que son capaces de percibir los sentidos de cualquier ser vivo se puede considerar información. (Arndt, 2001)

Durante el siglo XX, es donde la investigación sobre qué es información y en cómo se usa, se incentiva debido a la invención de la computadora por Alan Turing, aunque ya se trabajaba anteriormente con la información, en especial desde el siglo XIX, en búsqueda de comunicar de manera más rápida, Samuel Morse y Alfred Vall inventan el telégrafo eléctrico, a su vez Morse traduce el abecedario a un nuevo lenguaje que lleva su nombre, que tenía el fin de que los mensajes se transmitieran de una manera óptima; aunque hubo varios científicos que hicieron aportes a este campo solo se van a resaltar a Hartley y a Shannon, que contribuyeron al enfoque sobre la información que está relacionado con este trabajo. En 1924 Nyquist propone una tasa de transmisión ω que está en función los caracteres a transmitir m y del ancho de la banda B .

$$\omega = B \ln m$$

Hartley en 1928 inventa la unidad de medida de la información a partir de un hecho bastante simple, las respuestas a preguntas de “sí” o “no” ya que esta es la mínima cantidad de

información que se puede recibir, le llama a esta unidad BIT (*Unidad Binaria Indisoluble, Binary Indisoluble Unit*) y es la unidad de medida cuantitativa de la información, no porque se puedan tener cantidades físicas de información sino más bien para facilitar su estudio, esta cantidad se puede medir matemáticamente a partir de los logaritmos en base dos. También Hartley postula que la función que determina la información es una función creciente, asunto que va a tener relación con la información de Shannon. Él en 1948, parte de la teoría de la información que formuló Hartley, pero no estaba de acuerdo con unas de sus premisas; esto tenía que ver con las probabilidades de que un conjunto de caracteres tuviera de ser transmitido, para Hartley todos tenían la misma probabilidad, pero para Shannon no; dando, así como resultado la siguiente ecuación que es la **entropía de Shannon**. (Arndt, 2001)

$$I_{Shannon} = - \sum_{k=1}^n p_k \log_2 p_k$$

Donde p_k es la probabilidad de que el caracter k sea transmitida; fue llamado así por John von Neumann en una charla con Shannon, por el comportamiento que tenía y también fue gracias a las contribuciones de Hartley.

Este breve resumen de la historia de la termodinámica tiene como fin mostrar en qué condiciones han surgido estas leyes y como han evolucionado en la historia de la física estos conceptos los cuales serán de gran importancia para este trabajo por su trasfondo en la construcción conceptual, de la termodinámica de agujeros negros.

4.2.1.3 Introducción a la historia de la relatividad general

El paso por seguir es abordar el otro antecedente de la termodinámica de agujeros negros que es la relatividad general la cual tiene un componente teórico de mayor peso, pero su historia es más corta.

Antes de la relatividad general se tenía la relatividad especial que solo funcionaba como caso límite de la primera, entonces como bien se sabe el nacimiento de la relatividad especial no fue un hecho que mágicamente surgiera en la mente de Einstein, hubo un trasfondo histórico y unas teorías en las que se basó para poder llegar a la relatividad especial, los antecedentes llegaban desde Galileo pasando por Lorentz, hasta sus contemporáneos, como Poincaré y Minkowski, sin los cuales no se habría podido consolidar la teoría, este proceso tomó varios años y culminó en

1905 con la publicación del artículo. “*Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*”¹; este suceso fue revolucionario en su momento ya que forjó el nacimiento de la relatividad especial tanto como una prueba experimental a la mecánica cuántica de la cual se alejaría después. (Sánchez Ron, 1983)

El contexto que llegó a revolucionar fue uno de prevalencia de la visión ondulatoria de la luz, donde se había estado estudiando al éter como medio de transporte heredado de Huygens que implica que la luz requiere un medio para moverse y que mediante la solución de sus ecuaciones Maxwell comprobó teóricamente que la velocidad de la luz en el vacío es de aproximadamente de 300000 km/s; pero no fue hasta que el experimento de Michelson y Morley en 1887 donde esta teoría fue puesta en duda de una forma considerable; este fue el trasfondo óptico si se le puede decir así que llegó a modificar Einstein, pero no fue lo único que llegó a modificar, también la mecánica y sus elementos bases como lo son el tiempo y el espacio y nuestra relación con ellos, la mecánica pre-relativista que tenía como bases axiomáticas un tiempo y espacio absolutos e indiferentes del sistema de referencia donde se encontrará el observador o su estado de movimiento, también tenía como base la acción a distancia para sus interacciones entre los cuerpos, todo este bagaje en la física fue el que Einstein llegó a cambiar. (Sánchez Ron, 1983)

Ya habiendo establecido la relatividad especial en 1905, la cual daba una nueva perspectiva, en especial sobre lo que la mecánica trataba hasta el momento, había una parte que no terminaba de encajar, como se había mencionado este solo era un caso límite es decir que solo se aplica a marcos inerciales por lo tanto no logra explicar los marcos acelerados así como tampoco los “campos gravitacionales”, así que en pleno auge de la relatividad especial Einstein a quien esta situación le molestaba intenta hacer una aproximación sobre la generalización de la relatividad, en 1907 formula algo que después se convertiría en el principio de equivalencia, cosa sobre la que la relatividad general se basaría, desde ese año empezó a pensar en eso; en 1911 empezó con un enunciado que podría ayudar en esta tarea, “**la luz cambia su velocidad en un campo gravitacional**” y basándose en eso empezó a trabajar. (Sánchez Ron, 1983)

Debido a la similitud heurística entre un campo gravitacional y el problema de un disco que gira usó este último como recurso de aproximación al primero, alrededor de 1909, se pudo

¹ En español “Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento”

acercar al problema para poder abordarlo, el problema del disco que gira estudia primero el caso estático luego el estacionario, el problema que encontró y que fue la base para todo lo que se desarrolló después fue el de las coordenadas, este problema abarcaría tanto el obstáculo para la generalización de la relatividad general, así como su solución como se verá más adelante. (Sánchez Ron, 1983)

La geometría euclidiana que se manejaba en la relatividad especial no era adecuada para abordar el problema; ya que mostraba que en el cálculo de la longitud de una circunferencia dentro del disco que gira, cambiaba el valor de π dependiendo de si se analizaba desde un sistema en reposo respecto al disco o uno que se moviese con el disco en movimiento circular uniforme, sabiendo que este valor no podía cambiar, era la muestra de que la geometría no era la adecuada, tiempo después, en 1912, en un artículo resalta la importancia del tensor métrico para poder describir la geometría que tenía el espacio-tiempo. Aparte del problema de las coordenadas, había un problema mayor, el principio de la relatividad especial no era compatible con el principio de equivalencia en uno de sus postulados básicos (el de la invariabilidad de la velocidad de la luz); además que para campos gravitacionales débiles se debía cumplir la ley de gravitación universal de Newton. (Sánchez Ron, 1983)

El problema era encontrar una matemática que fuese adecuada en este cálculo y esto lo obtuvo de estudiar a Gauss y cómo él sacó las propiedades métricas, y con ayuda también de la formulación cuatridimensional variacional de las ecuaciones de movimiento que planteó Planck en 1906; con estas ayudas y aún con el problema de la métrica buscó ayuda en su amigo de universidad Grossman, con el cual se disponen a formular la generalización de la relatividad mediante un trabajo en conjunto, Einstein dedicado a la parte física y Grossman a la parte matemática, juntos llegaron a unas ecuaciones de campo que resultaron ser incorrectas ya que partieron de premisas que no fueron acertadas para la resolución de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. Por lo tanto, no solo había que hallar los valores de la métrica sino además un tensor que describa cómo se curva el espacio en presencia de materia, para encontrar ese tensor se requería cumplir ciertas condiciones, como que el tensor debía ser covariante bajo cualquier sistema de coordenadas también que se pueda construir a partir del tensor métrico y sus derivadas de primer y segundo orden, y finalmente que en campos gravitacionales débiles y bajas velocidades se debe cumplir la ecuación de Poisson y la ley de Newton de la gravitación universal.

La falta de las ecuaciones que definieran la métrica llevó a la reconsideración de uno de los pilares de la relatividad especial, el cual es el principio de relatividad general que dicta que debe haber una covarianza entre las leyes físicas para marcos de referencia distintos. El caso es que en 1914 publicaron una aproximación a estas ecuaciones, pero tenían unas condiciones que no las hacían candidatas a las ecuaciones definitivas. Einstein después de esto y de haber aprendido lo necesario, continúa trabajando en solitario. Durante el año 1915 Einstein hizo varias publicaciones, mostrando en cada una los avances que hacía de las ecuaciones, pero siempre fueron aproximaciones, en el mes de noviembre publica sus ecuaciones de campo, pero Hilbert también había llegado a ellas antes que Einstein con unos días de diferencia, aunque ambos partieron de premisas físicas diferentes. (Sánchez Ron, 1983)

$$R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2}g_{\alpha\beta}R + \Lambda g_{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\alpha\beta}$$

Dónde $R_{\alpha\beta}$ es el tensor de Ricci, $g_{\alpha\beta}$ es el tensor métrico que muestra la geometría del espacio-tiempo, R es el escalar de curvatura que indica cómo se curva el espacio-tiempo, Λ es la constante cosmológica (introducida por Einstein para mantener la concepción del universo estática), c es la velocidad de la luz, $T_{\alpha\beta}$ es el tensor de materia y energía, que indica como es la distribución de la materia.

Schwarzschild quien llega a la solución de las ecuaciones de campo mientras estaba en la guerra, a inicios de 1916, formula una solución que da como resultado una singularidad que al inicio se toma como matemática, pero se termina entendiendo como física, a esta singularidad se le llama el agujero negro de Schwarzschild cuya única característica es tener masa. Este agujero negro está definido por la métrica que lleva el mismo nombre.

$$ds^2 = -c \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) dt^2 + \left(\frac{1}{1 - \frac{2GM}{c^2 r}}\right) dr^2 + r^2 d\theta^2 + \text{sen}^2\theta d\varphi^2$$

Dónde G es la constante de gravitación universal, M es la masa del objeto, c es la velocidad de la luz y r, θ, φ son las componentes de las coordenadas esféricas en las que está dada la métrica. (Sánchez Ron, 1983)

Este tipo de agujero negro tiene unas características que vale la pena mencionar, tal como que este es el más sencillo, por el teorema de no pelo, estos objetos solo pueden ser descritos

mediante tres magnitudes físicas, masa, carga y momento angular. Este tiene únicamente masa, y es estático esto quiere decir que las posiciones relativas no varían en función del tiempo por lo tanto no hay fuerzas y tampoco toque así a pesar que hay una distorsión del espacio tiempo no hay entrelazamiento entre las componentes espaciales y temporales, manteniendo la geometría con sus componentes linealmente independientes; dado que es estático presenta una simetría temporal. Y se cumple una ley interesante, el teorema de Birkhoff que indica que cada solución simétricamente rotacional a las ecuaciones de Einstein con $\Lambda = 0$ y $T_{\mu\nu} = 0$ da como resultado un agujero negro de Schwarzschild (Hájíček, 2008)

En 1963 Kerr publica una solución para un agujero negro con momento angular, habiendo hecho esto quiso generalizar a un agujero negro que también tuviese carga eléctrica, para esto pidió la ayuda de Debney, aunque este tampoco lo logró y pidió ayuda a Newman, quien en 1965 publica un artículo donde da una solución a la ecuación de Einstein de tal forma que da un agujero negro que rota y que tiene carga partiendo de la métrica de Reissner-Nordström. Lo que da la siguiente métrica (Newman, y otros, 1965):

$$ds^2 = \frac{\Delta}{\Sigma} \left[cdt - \frac{a}{c} \text{sen}^2\theta d\theta \right]^2 + \frac{\text{sen}^2\theta}{\Sigma} \left[\left(r^2 + \frac{a^2}{c^2} \right) d\varphi - a dt \right]^2 + \frac{\Sigma}{\Delta} dr^2 + \Sigma d\theta^2$$

Donde:

- $a = \frac{J}{Mc}$ es un parámetro denominado, parámetro de Kerr.
- $\Delta = r^2 - \frac{2GM}{c^2} + a^2 + Q^2$
- $\Sigma = r^2 + \frac{a}{c^2} \cos^2\varphi$

También se pueden simplificar estas expresiones usando $S_r = \frac{2GM}{c^2}$, el cual se define como el radio de Schwarzschild.

Así como el agujero de Schwarzschild tiene sus características, el de Kerr-Neuman tiene las suyas, como que dada su rotación se presentan unas fuerzas de marea tan fuertes capaces de entrelazar las componentes espaciales y la temporal dando así una geometría en las que sus componentes no son linealmente independientes (o surgen términos óblicos), por lo tanto no cumple una simetría temporal y la forma de escribir su métrica no es Lorentziana (-,+,+,+ o +,-,-,-), todo esto puede llevar a que se considere a estos agujeros negros junto con los de Kerr como

máquinas del tiempo, ya que dentro de estos objetos la componentes espaciales se intercalan con la temporal, permitiendo viajar en el tiempo como se viaja en el espacio hipotéticamente. Como este agujero tiene carga que rota esto implica que también forma un campo electromagnético así que para estudiarlo se debe tener en cuenta al tensor electromagnético; y debido a que en ciertos cuerpos astronómicos con campo magnético y con rotación se ha observado que los ejes de rotación y el eje magnético están alineados, así que se asume que estos objetos pueden cumplir esta misma característica, que hace a estos agujeros axisimétricos respecto a ambos ejes alineados. (Hájíček, 2008)

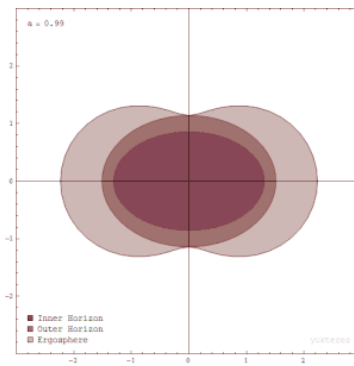


Ilustración 6 Ergosfera de un agujero de Kerr tomado de: <https://en.wikipedia.org/wiki/Ergosphere>

4.2.1.4 Historia de la termodinámica de agujeros negros.

Hace más de dos siglos se había observado que algunas estrellas se trasladaban en rededor del “vacío” y que lo hacían a grandes velocidades, así que se planteó la idea de que podían ser “estrellas oscuras” de las cuales solo se podía evidenciar su influencia gravitacional. En 1784 John Mitchell, en vista de las observaciones de las que se acaba de hablar introduce el concepto de agujero negro, pero es John A, Wheeler el que le da el nombre de agujeros negros. Unos treinta años antes Oppenheimer postula un posible origen de los agujeros negros el cual es de la implosión gravitacional de estrellas masivas. (Frolov & Novikov, 1997)

En los años setenta (1973) se dio nacimiento a la termodinámica de agujeros negros con el trabajo de Hawking, Carter y Bardeen con la postulación de las cuatro leyes de la termodinámica de agujeros negros las cuales están basadas en las leyes de la termodinámica clásica y se han

construido en el siguiente orden²: segunda ley, primera ley, ley cero y finalmente la tercera ley. En 1971 Hawking había publicado otro artículo donde muestra que hay una discriminación entre el pasado y el futuro de una partícula en el horizonte de eventos lo cual se conoce de manera clásica como la entropía (la flecha del tiempo), y en este artículo se basa Bekenstein para que se le asocie una entropía al agujero negro en 1973, Bekenstein llega a la conclusión de que la entropía que está coligada a su área superficial (horizonte de sucesos) y por lo tanto, la información de un agujero negro es limitada y está dada por el límite que lleva su nombre.

Luego en una conferencia en la Unión Soviética en 1973 Stephen Hawking se encuentra con dos científicos soviéticos (Yacob Zeldovich y Alexander Starobinsky) los cuales le formulan la idea de que, en los agujeros negros rotatorios, según el principio de indeterminación de Heisenberg deberían emitir una radiación de partículas que después sería más profundizada por el mismo Hawking, él publica un artículo sobre eso al año siguiente dando origen teórico a la radiación que lleva su nombre. Esta radiación, aunque es mínima y muy difícil de detectar podría ser una forma de probar que los agujeros negros tienen entropía.

A continuación, se van a abordar los conceptos que están relacionados con el aspecto metodológico de este trabajo, como lo son los cambios de paradigma y la metacognición.

4.2.2 MARCO TEÓRICO METODOLÓGICO.

4.2.2.1 Sobre los cambios de paradigma

Se hará un acercamiento a los cambios de paradigma que surgieron formalmente en 1962 con la publicación de un libro llamado *La estructura de las revoluciones científicas*, el autor Thomas Kuhn, un filósofo de las ciencias; en esta publicación hace un análisis histórico para explicar la dinámica de las ciencias puras o duras.

Las dinámicas según Kuhn son cíclicas pero cada vez que sucede una, esto implica “añadir” conocimiento científico al ya existente o la modificación conceptual de una teoría o el cambio de perspectiva de una teoría o la eliminación de dicha teoría, estos procesos cíclicos tienen tres partes que los caracterizan: la *ciencia normal*, la *revolución científica*, y finalmente el *cambio de*

² El orden de la construcción de las leyes de la Termodinámica de Agujeros Negros es una decisión que no es argumentada por los autores.

paradigma, la dinámica se da de la siguiente manera, primero la comunidad científica está bajo la *ciencia normal*, esta es una teoría que es capaz de explicar lo que hay en el momento aunque con sus puntos débiles sin resolver. (Kuhn, 1992)

Ahora en la época de *ciencia normal* la comunidad científica está volcada a seguir ahondando en esa teoría así que la probabilidad que se descubra algo nuevo es bastante baja, de vez en cuando durante las investigaciones *normales* se llega a un problema que a pesar de los intentos de seguir enmarcando estas falencias dentro del paradigma vigente no puede ser explicada por estos, es ahí donde surge el candidato a *nuevo paradigma*, al inicio se podría presentar resistencia por parte de la comunidad científica pero con el tiempo y las argumentaciones y mejores mediciones se va aceptando la *nueva* teoría ya que esta puede explicar por ejemplo los vacíos de la anterior de manera más precisa, a este proceso de cambio de teoría se le llama *cambio de paradigma* y se da durante la *revolución científica*, ya que es un cambio de modelo teórico y explicativo donde no necesariamente el paradigma antiguo desaparece sino que el nuevo puede absorberlo o se puede instaurar una nueva teoría y en este proceso la forma de estudiar el fenómeno en cuestión cambia, puede que mantenga sus formas matemáticas y algunos términos para referirse a algún fenómeno en específico pero no serán vistos de la misma manera así que el paradigma antiguo pierde parte de su estructura. La última parte de este proceso consiste que la teoría nueva siga ahondando en sus propias falencias y en mejorar sus argumentos de convencimiento, así se convierte en *ciencia normal*, luego, cuando hay una nueva crisis el ciclo se repite. (Kuhn, 1992)

Cabe resaltar que los cambios de paradigma no necesariamente son globales es decir que no necesariamente cambian una disciplina completamente como el cambio de paradigma hecho por Isaac Newton; existen cambios de paradigma a menor escala y estos afectan una pequeña parte del conocimiento y en el caso de este trabajo este es uno de estos, en el caso de la termodinámica de agujeros negros este cambio tiene una naturaleza más encaminada en relacionar ramas de la física y el aumento del estudio sobre los agujeros negros, que en desmentir o complementar fallas conceptuales de la relatividad general o la termodinámica clásica. (Kuhn, 1992)

4.2.2.2 Sobre la metacognición

La metacognición surge a partir de unos experimentos sociales hechos por John Flavell en la década de los setenta con niños sobre la cognición, donde evidencia que entre mayor edad

tuviesen los niños podían dar cuenta de mejor manera sobre unas tareas que se les pusieron, y esto se debe a partir de su propia experiencia al haberse enfrentado a otras tareas en el pasado y su capacidad de poder extrapolarla a otras actividades o crear habilidades nuevas para desarrollar dicha tarea, por lo tanto citando a Flavel “*Las estrategias cognitivas apelan a crear progresos cognitivos, y las estrategias metacognitivas a monitorearlos*” (Flavel, 1979), ahora bien la metacognición es un monitoreo sobre los procesos cognitivos, y este monitoreo se da cuando estos cuatro fenómenos se relacionan entre sí, los cuales son:

- El *conocimiento metacognitivo* el cual se trata sobre los procesos y vivencias propias y ajenas, y las diferencias
- Las *experiencias metacognitivas* tratan sobre el bagaje de la persona sobre el aprendizaje
- Las *tareas u objetivos* son las metas de aprendizaje o los ejercicios para realizar y
- Las *estrategias o acciones* son las diferentes metodologías que se aplican para lograr un *objetivo o tarea*.

La metacognición es un proceso personal ya que se fundamenta en el aprendizaje ya logrado y la experiencia sobre el mismo para obtener nuevo conocimiento, a pesar de esto según (Alzate, Alzate, & Londoño, 2019) existen unos procedimientos de regulación de la cognición que son una generalidad en el ejercicio metacognitivo, estos procesos se dan durante todo el ejercicio; y están especificados en el siguiente diagrama.

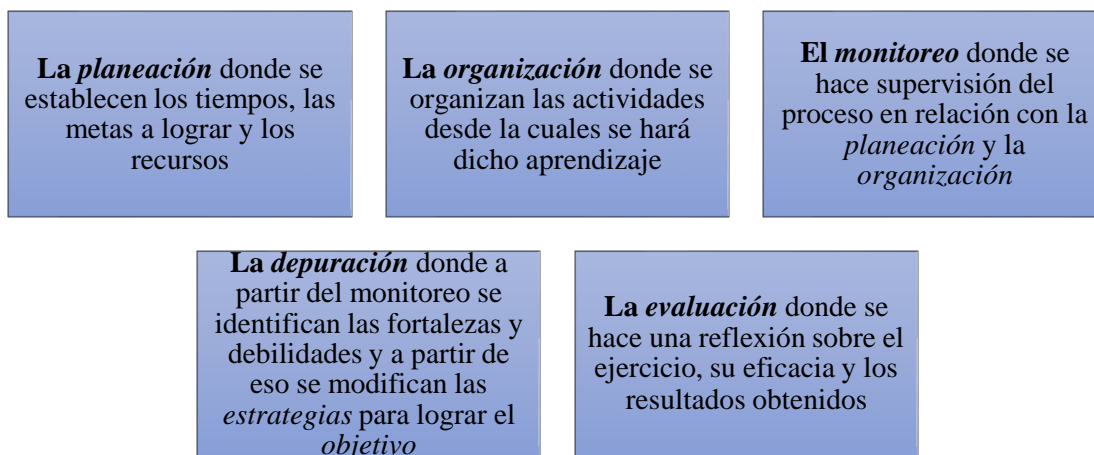


Ilustración 7 Etapas del ejercicio metacognitivo

Estos procedimientos de regulación están acompañados por un conocimiento sobre la cognición que se presenta en tres estadios los cuales son:

- El *conocimiento declarativo* donde está contenido el saber sobre el aprendizaje del individuo y el uso de sus capacidades cognitivas
- El *conocimiento procedimental* el cual es sobre el uso de las estrategias de aprendizaje propias.
- El *conocimiento condicional* el que consiste en conocer en qué situación se puede usar cierta estrategia y la razón de usarla.

Este tipo de ejercicios es muy útil a la hora de profundizar en cualquier tema de cualquier área del conocimiento humano y será usada en este trabajo para conseguir comprender el cambio de paradigma que se dio en el surgimiento de la termodinámica de agujeros negros.

5 DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.

5.1 COMPONENTE METODOLÓGICO.

Debido a la naturaleza disciplinar de este trabajo y la perspectiva personal desde la cual se quiso abordar, este tiene un carácter cualitativo documental, y los pasos para el desarrollo se dieron en función de los procesos de regulación de un ejercicio metacognitivo (planeación, organización, monitoreo, depuración y evaluación) dadas en (Alzate, Alzate, & Londoño, 2019), dado que el objetivo de este trabajo es lograr encontrar el cambio de paradigma de la termodinámica de agujeros negros, se debe tener cierto nivel de comprensión del tema y como dice (Kuhn, 1992) la forma cómo se aprende la ciencia influye en cómo se ve y se hace ciencia; coincidiendo con el autor la finalidad de este trabajo es profundizar en los conocimientos ya existentes y añadir algunos nuevos para lograr el cumplimiento objetivo.

Como se mencionó anteriormente, se siguieron las etapas de la regulación de un ejercicio metacognitivo, respecto a la fase de *planificación*, esta comprende la búsqueda de fuentes y recursos, el planteamiento de metas y de tiempos para hacer la empresa cognitiva.

En este caso en particular se tomaron los recursos y las fuentes que serán mencionados en la siguiente tabla en relación con las temáticas abordadas; se empezó, en el orden de los objetivos específicos, es decir que para la construcción del trabajo se empezó haciendo un estudio sobre la

termodinámica y la construcción histórica de esta disciplina. Después como el desarrollo histórico se dio de esa manera, se hizo un paso por la mecánica estadística y luego por la mecánica cuántica que también tiene un origen en la termodinámica y más tarde se llegó a la teoría de la información, enseguida se abordó la relatividad general pasando de una manera somera por la relatividad especial, en este abordaje de la relatividad general se tocaron únicamente la solución de las ecuaciones de campo de Einstein hechas por Schwarzschild y la de Kerr-Newman, ya que está última en específico es sobre la cual se trabaja en la termodinámica de agujeros negros por último a nivel histórico se aborda la termodinámica de agujeros negros y la parte conceptual será tratada en el siguiente apartado los textos usados sirvieron para complementar conocimientos ya existentes y adquirir nuevos o nuevas comprensiones sobre lo ya existente. En la siguiente tabla se especificarán los textos y sus usos.

Texto abordado	Disciplina
History of Thermodynamics the Doctrine of Energy and Entropy (Müller, 2007)	Termodinámica clásica y mecánica estadística
Física (Serway, 1985)	Termodinámica clásica
Biografía de la Física (Gamow, 2010)	Termodinámica clásica y mecánica cuántica
Introducción a la Física Moderna (García Castañeda & Ewert De-Geus, 2008)	Mecánica cuántica
Information Measures Information and its Description in Science and Engineering (Arndt, 2001)	Teoría de la información
Origen y Desarrollo de la Relatividad (Sánchez Ron, 1983)	Relatividad especial y general
An Introduction to the Relativistic Theory of Gravitation (Hájíček, 2008)	Relatividad general
Black Hole Physics: Basic Concepts and New	Termodinámica de agujeros negros

Developments (Frolov & Novikov, 1997)	
Black Hole Information and Thermodynamics (Lüst & Vleeshouwers, 2019)	Termodinámica de agujeros negros
Mass Formula for Kerr Black Holes (Smarr, 1973)	Termodinámica de agujeros negros
The Four Laws of Black Hole Mechanics (Bardeen, Carter, & Hawking, 1973)	Termodinámica de agujeros negros
Black Holes and Entropy (Bekenstein, 1973)	Termodinámica de agujeros negros

Tabla 3 Textos usados durante el ejercicio metacognitivo

Las metas que se propusieron son la comprensión de los paradigmas previos (termodinámica clásica y la relatividad general) y las leyes de la termodinámica de agujeros negros que requieren ciertos conocimientos en el área de tensores, termodinámica clásica y teoría de la información.

Y los tiempos para lograr estos objetivos se plantearon desde octubre del año 2020 hasta julio de 2021, donde desde el mes de octubre se empezó una lectura de los temas mencionados en la secuencia anteriormente mencionada, no se pusieron fechas estrictas a la obtención de estos logros ya que de manera previa se conocía la dificultad de estas temáticas y se buscó darle el tiempo necesario al aprendizaje de cada una.

En la etapa de la organización se plantearon los pasos que están dados por los objetivos específicos, la metodología que se usó abarcó la búsqueda de las fuentes originales en especial en el área de la termodinámica de agujeros negros, luego de hacer una lectura minuciosa de estos textos y la búsqueda de los conceptos que no se lograban entender en libros de uso académico hasta lograr la comprensión necesaria del texto, y en el caso de la relatividad general, la termodinámica (incluidas la mecánica estadística, la mecánica cuántica y la teoría de la información) se usaron otros libros donde se hacía contextualización histórica y conceptual. Luego de esta lectura se hizo un resumen de estas temáticas y se buscaba ponerlo en las propias palabras como forma de **monitorear y evaluar** la comprensión de lectura hecha, de esta forma se procedió durante todo el ejercicio.

El siguiente paso es *la depuración*, en esta cuando no se lograba la comprensión de algún concepto en específico se buscaban fuentes diferentes donde las explicaciones fuesen más claras (como se mencionó en el párrafo anterior) y se buscaban explicaciones en videos en internet o de compañeros para poderle dar sentido a lo que se había leído y de esta forma seguir en la dinámica de resumir y poderlo explicar en las propias palabras.

En el caso de *las fases de monitoreo y evaluación* estas fueron paralelas a la etapa de la organización, el monitoreo se daba en el seguimiento de las fuentes y la búsqueda de nueva bibliografía como el caso de la teoría de la información donde el texto de *History of Thermodynamics the Doctrine of Energy and Entropy* la teoría de la información no me fue comprensible y opte por usar el texto *Information Measures Information and its Description in Science and Engineering* así se lograba seguir en el proceso de resumen y comprensión.

La forma de evaluar el ejercicio era mediante el proceso de pasar el resumen de los textos a mis propias palabras, ya que, si no era entendible, la interpretación había sido incompleta y se debía retomar la lectura y el resumen y volver a hacer el ejercicio. La formalización matemática no fue abordada en este trabajo ya que en primer lugar no es el propósito final del trabajo y en segundo el nivel de comprensión superaba el nivel de formación de la autora, ya que son matematizaciones en el nivel de posgrado.

Cabe aclarar que a pesar de que hay unos pasos en el ejercicio metacognitivo, estos se pueden realizar de manera paralela como en el caso de la organización, monitoreo y la depuración, que la planeación inicial no es rígida ya que en la fase de depuración se busca ir corrigiendo las estrategias metacognitivas y las metas de la empresa cognitiva

5.2 COMPONENTE DISCIPLINAR.

A pesar de la gran contribución de Einstein a la cuántica en sus inicios con el efecto fotoeléctrico, él no estaba ideológicamente de acuerdo con esta, por lo tanto, las partículas y su naturaleza cuántica no fueron variables a considerar al momento de formular sus ecuaciones de campo, de aquí que las cuatro soluciones más conocidas de los agujeros negros (Schwarzschild, Reissner- Nördstrom, Kerr y Kerr- Newman) tampoco involucren estos fenómenos; se puede decir que en cuanto a lo que estaba sucediendo respecto a el paradigma vigente de la relatividad general, estas soluciones que dan respuesta a las ecuaciones de campo de Einstein estaban en un marco de ciencia normal ya que según lo planteado por Kuhn y lo que se hace durante un periodo

de ciencia normal es profundizar en el paradigma imperante, esto conduce a las variadas soluciones de los agujeros negros y sus diferentes métricas, la verificación de la teoría con la precesión de Mercurio, y otras investigaciones que se fueron dando sobre las implicaciones de las ecuaciones de campo; no obstante la mecánica cuántica se desarrolló como un nuevo paradigma de manera paralela haciendo sus propias investigaciones normales que implicaron resultados interesantes que chocaban con la relatividad general en aspectos estructurales como el entrelazamiento cuántico o las variables ocultas, entre otras; en ocasiones se dieron debates álgidos entre ambos grupos en los que se consideraban vacíos en especial de la mecánica cuántica que de hecho aún no se han solucionado.

Mientras tanto en los años sesenta y setenta surgían unos descubrimientos interesantes hechos por Bekenstein, Hawking, Penrose, Christodoulou entre otros, esto fue la introducción de conceptos que hacen parte de la Termodinámica Clásica (TC) a las soluciones de los agujeros negros en especial la de Kerr (cuerpo rotante) y sobre todo la de Kerr-Newman (cuerpo rotante y cargado), es el inicio del cambio de paradigma, ya que implicó tener ciertas consideraciones en cuenta que no se habían hecho y adicionar constantes y conceptos de la mecánica cuántica como consecuencia de introducir variables termodinámicas como la temperatura y la entropía, así como sucedió en la historia donde al estudiar la radiación de cuerpo negro se “crea” la mecánica cuántica.

En su texto Bardeen, Carter y Hawking (1973) construyen a partir de estudios topológicos, geometría diferencial, y algo de mecánica de fluidos las cuatro leyes de la termodinámica de agujeros negros, empiezan con la construcción de la primera ley que tendría su semejanza con su análoga de la TC en que representa una ley conservativa, luego ellos demuestran la ley cero donde la analogía es la gravedad de superficie (concepto que será abordado posteriormente) con la temperatura, luego formulan la segunda ley donde la analogía es el área del horizonte de sucesos con la entropía y finalmente la tercera ley que surge de la ley cero.

Para poder hacer estas analogías y concluir con las leyes de la termodinámica de agujeros negros (TAN) se debe hablar de la formula diferencial de la masa, para eso se empieza tomando las dos soluciones a las ecuaciones de campo de Einstein que se mencionaron anteriormente ya que su característica rotativa es primordial para llegar a las leyes de la TAN, la primera consideración que se debe tener en cuenta es un disco de materia rotando en rededor del agujero

negro en cuestión (se hablará del agujero negro de Kerr- Newman ya que es la solución más completa), la segunda consideración está relacionada con la primera, como es un agujero negro de Kerr-Newman entonces el agujero negro debe ser axisimétrico y estacionario. Para empezar, se introducen: un vector de Killing K^{a3} el cual describirían la conservación de la masa en una superficie y un vector de Killing rotacional \tilde{K}_a que describirá, la conservación del momento angular, estos vectores van en la intersección de la superficie de los agujeros negros y la Hipersuperficie S . Los vectores de Killing son vectores que indican la dirección en un campo vectorial donde se dan simetrías, es decir dónde las cantidades se conservan, por eso son usados para hablar de la primera ley de la TAN la cual es una ley conservativa.

Es necesario especificar primero las superficies S y ∂B , las cuales son superficies donde se aplican los vectores de Killing y por lo tanto las secciones $d\Sigma_b$ representa un elemento de área de la superficie del disco de materia que está en contacto con el horizonte de sucesos del agujero y $d\Sigma_{ab}$ representa un elemento de área del horizonte de eventos. Como se puede ver en la representación grafica a continuación.

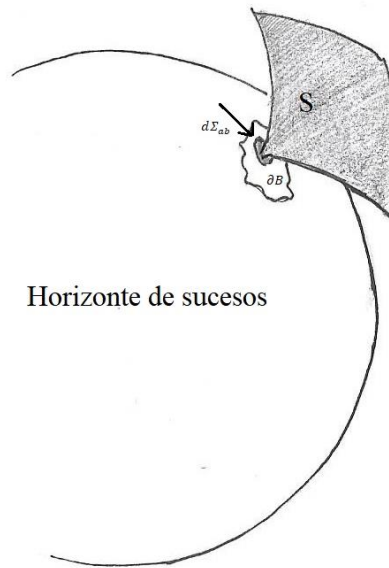


Ilustración 8 Representación gráfica de las superficies S , $d\Sigma_{ab}$ y ∂B

³ Los vectores de Killing son “herramienta estándar de describir la simetría” según (Misner, Thorne, & Wheeler, 1971) y está definido por la siguiente ecuación.

$$\frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x^a} = 0$$

En las siguientes expresiones se usa T_a^b que es el tensor de materia-energía, su uso se justifica con la célebre frase de John A. Wheeler “*La materia le dice al espacio como curvarse y el espacio le dice a la materia como moverse*” ya que se está hablando de cómo el espacio-tiempo esta deformado por la masa del agujero negro. La siguiente expresión es la formulada por los autores para el momento angular de todo el sistema.

$$J = - \int_S T_b^a \tilde{K}^b d\Sigma_a - \frac{1}{8\pi} \int_{\partial B} \tilde{K}^{a;b} d\Sigma_{ab} \quad (1)$$

La primera integral hace referencia al momento angular del disco de materia y la segunda al del agujero negro. Para hablar de la conservación de la masa se debe tener en cuenta un concepto, que es fundamental, la gravedad de superficie κ , que podría definirse como la aceleración gravitacional que experimenta un cuerpo sobre una superficie, en otras palabras, una gravedad medida en superficies de nivel. Y la gravedad de superficie al ser adicionada al momento angular del que se habló previamente da como resultado la siguiente expresión.

$$M = \int_S (2T_b^a - T\delta_a^b) K^a d\Sigma_b + 2\Omega_H J_H + \frac{1}{4\pi} \int_{\partial B} \kappa dA \quad (2)$$

Aquí M hace referencia a la masa del sistema agujero negro-disco de materia; Ω_H es la velocidad angular del agujero negro, J_H es el momento angular del agujero negro, κ es la gravedad de superficie, y dA es un elemento de superficie sobre el horizonte de sucesos relacionado con $d\Sigma_{ab}$; posteriormente se introducen dos variables relacionadas con el disco de materia, ya que se asume que es un fluido perfecto luego las variables que se introducen son la temperatura θ y el potencial químico μ (el cual es el cambio de energía del disco si se le aumentase una partícula). La introducción de estas variables conlleva a la inclusión de otras, dado que el disco de materia está rotando, tiene materia (valga la redundancia) y una temperatura asociada, entonces también tiene momento angular J , número de partículas N y entropía S . Estas variables al introducirlas a la ecuación (2) da como resultado:

$$dM = \frac{\kappa}{8\pi} dA + \Omega_H dJ_H + \int \Omega dJ + \int \bar{\mu} dN + \int \bar{\theta} dS$$

Que representa la primera ley de la TAN donde las expresiones: κdA la cual es la gravedad de superficie que se puede apreciar en un elemento de área, $\Omega_H dJ_H$ es la velocidad a la que debe girar el agujero negro para tener una variación del momento angular, ΩdJ es la velocidad a la

que debe girar el disco de materia para que cierta cantidad de materia cruce el horizonte de sucesos y $\bar{\mu} dN$ es una variación de la energía del sistema agujero negro-disco producida por el ingreso de partículas al agujero negro, (esta energía tiene un desplazamiento al rojo debido a la distorsión del espacio-tiempo producida por el mismo agujero negro) estas cuatro primeras expresiones son análogas al trabajo y finalmente $\bar{\theta} dS^4$ es el calor alcanzado por el disco de materia cuando traspasa el horizonte de sucesos, aquí se puede ver la analogía con la primera ley de la TC

$$dE = TdS + PdV$$

Se presenta un asunto interesante a abordar, debido a las características gravitacionales del agujero negro, no hay información sobre el interior de este ya que no hay radiación que pueda salir para obtener información la única forma de estudiar estos cuerpos es con las características de masa, carga y momento angular. Por lo tanto, se entiende la decisión inicial tomada por los autores, de poner a interactuar con un disco de materia al agujero negro ya que las interacciones termodinámicas que se dan son la única forma de poderlo estudiar termodinámicamente. Esto es lo novedoso, lo que se puede considerar el inicio del cambio de paradigma: la introducción y modificación de conceptos termodinámicos en el contexto de la relatividad general.

Recordando que la analogía con la primera ley de la TC sería una propiedad de conservación, en el caso de la TAN (el sistema disco-agujero negro) la masa sería la cantidad a conservar considerando al sistema cerrado; para la primera ley de la TC (que también es una ley de conservación) lo que se conserva es la energía interna del sistema el cual también se considera un sistema cerrado, así que el lugar común de estas leyes sería el principio de conservación, donde las variables físicas que dan cuenta de este lugar común son la energía interna y la masa; y estas dos también esta relacionadas en la relatividad especial gracias a la famosa ecuación de Einstein.

$$E = mc^2$$

⁴ La temperatura $\bar{\theta}$ es una temperatura también desplazada al rojo así que aquí se puede ver un concepto que será abordado por Unruh en 1976 el cual lleva su nombre y habla de la percepción de una temperatura diferente por dos observadores sobre la temperatura de un agujero negro. También cabe añadir que la temperatura efectiva de un agujero negro es el cero absoluto, eso quiere decir que no hay ningún cuerpo negro cuya radiación pueda equiparar la de un agujero negro.

Esta se puede decir que es la primera ley que recoge tres ámbitos diferentes gracias a sus analogías, la siguiente expresión que tendrá la misma naturaleza se abordará más adelante.

Como se mencionó antes la analogía de las primeras leyes es solo el inicio, hubo más implicaciones, por lo tanto, la siguiente ley por abordar es la ley cero de la TAN que indica que

“La gravedad de superficie de un agujero negro estacionario es constante sobre toda la superficie” (Bardeen, Carter, & Hawking, 1973)

Y La ley cero de la TC dice que,

Si los cuerpos por separado A y B están en un equilibrio térmico con un tercer cuerpo C, entonces los cuerpos A y B están en equilibrio térmico entre sí (Serway, 1985)

Recogiendo lo anterior se puede plantear la pregunta de si realmente son similares. Para solucionar esta duda se empieza a hacer la analogía por lo tanto se va a definir el teorema de no pelo mencionado anteriormente, planteado por John A. Wheeler en 1972 en base a otros teoremas que fueron formulados en la época sobre la forma de describir un agujero negro, este teorema dice:

“La estructura de un agujero negro es determinada únicamente por masa M , carga Q y por su momentum angular intrínseco J ” (Misner, Thorne, & Wheeler, 1971)

A partir de este momento se habla del “pelo” para hablar de la información sobre las variables que describen el agujero negro.

(Bekenstein, 1973) hace un análisis sobre esto para decir que un agujero negro está en equilibrio cuando “ha perdido todo su pelo” eso quiere decir que solo puede ser descrito por las variables nombradas en el teorema y ha perdido toda la información sobre las condiciones iniciales del agujero negro, solo llegado a ese punto la gravedad de superficie es constante sobre todo el horizonte de sucesos (Frolov & Novikov, 1997).

Ahora traduciendo a otras palabras la ley cero de la TC un sistema está en equilibrio cuando todas sus partes están a la misma temperatura; como se mencionó anteriormente el lugar común de estas leyes cero es el equilibrio, por lo tanto, la variable que describe el equilibrio en la TAN es la gravedad de superficie y en la TC es la temperatura, de esto viene la analogía entre ambas leyes no de la similitud entre la temperatura y la gravedad de superficie sino de que ambas describen un sistema en equilibrio.

Como se anticipó en la explicación de la analogía de las leyes uno, hay otra analogía con implicación triple; esta analogía es entre la segunda ley de la TAN y la segunda ley de la TC.

La segunda ley de la TAN parte de un teorema llamado el teorema de las áreas formulado por (Hawking, 1971) el cual dictamina que:

“Si dos agujeros colisionan, la suma de sus áreas (A_1 y A_2) de sus respectivos horizontes de sucesos es menor que el área del horizonte de sucesos del agujero resultante A_R ”

$$A_R > A_1 + A_2^5$$

Ahora la segunda ley de la TAN dice que:

“El área del horizonte de sucesos de cada agujero negro no decrece con el tiempo”
(Bardeen, Carter, & Hawking, 1973)

$$dA \geq 0$$

Esta ley se fundamenta en una conclusión hecha por Floyd y Penrose en la cual determinan que el área de un agujero negro tiende a aumentar bajo cualquier transformación (cualquier cambio en las variables masa, momento angular y carga). (Bekenstein, 1973)

Y la segunda ley de la TC dice que la entropía de un sistema solo puede crecer en el tiempo, o como lo decía Carnot “el calor no puede ir de un lugar de menor temperatura a uno de mayor temperatura”

$$dS \geq 0$$

En este caso el lugar común que tienen estas leyes está en que son variables físicas que se representan por funciones monótonamente crecientes (es decir que son funciones en constante crecimiento), y las variables que representan esta característica en el caso de la TAN es el área del horizonte de eventos y en la TC la entropía.

Pero esto no llega únicamente hasta aquí, en las analogías hechas por (Bekenstein, 1973) todos los agujeros negros tienen masa y debido a la relación de Einstein $E = mc^2$ también tienen

⁵ En Julio de 2021 se publica la nota en la página del MIT donde muestra que unos científicos de varios institutos incluido el MIT estudiaron las frecuencias de las primeras ondas gravitacionales que se hallaron en LIGO y gracias a esos estudios se llega a la comprobación de la ley de las áreas donde cuando los agujeros negros iniciales al unirse dieron otro agujero negro cuya área no es menor que la de los agujeros anteriores (Chu, 2021)

una energía, pero esta no puede ser aprovechada ya que no toda se puede transformar en trabajo y esta se puede obtener por el proceso de Penrose⁶ pero esta energía/masa tiene un límite, el cual es el de **masa irreducible** de Christodoulou y está relacionado con el área de manera directamente proporcional (si la masa del agujero negro aumenta, su área lo hace también y si su masa se reduce su área lo hará igual), es decir que hay una energía de base que no se puede extraer y como no se puede extraer es de “baja” calidad y esto termodinámicamente hablando la entropía, y la entropía de los agujeros negros es la más alta entre todos los cuerpos del universo.

Trayendo de nuevo al teorema de no pelo los agujeros tienen muy poca información ya que solo se conocen tres características de ellos, por consiguiente, su entropía informática también es bastante alta, como no se puede extraer radiación del agujero negro por su gravedad no se puede aumentar la información de este. Ahora, esa entropía informática está relacionada con la entropía termodinámica, mediante un tratamiento semiclásico que hace Bekenstein ya que en últimas se está hablando de entropía. Como se dijo, la entropía se puede describir como una función monótonamente creciente, y está asociada al área, y la información tiene unidades adimensionales (los bits) lo que implica que la entropía de un agujero negro se puede escribir de la siguiente forma:

$$S_{an} = \gamma A$$

Donde A es el área del horizonte de sucesos y γ es una constante que debe tener unidades de área con exponente negativo al cuadrado y según Bekenstein la única constante que tiene esta característica es el recíproco de la longitud de Planck al cuadrado la cual es:

$$l_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = 1.616199 \times 10^{-35} m$$

Luego

$$l_p^{-2} = 3.828 \times 10^{69} m^{-2}$$

Dando como resultado que la entropía en términos de información sea de la siguiente forma:

$$S_{an} = \eta l_p^{-2} A$$

⁶ Es un proceso en el cual se puede “extraer” energía del agujero negro de Kerr-Newman a partir de extraer trabajo de la Ergosfera, y la forma de hacerlo es disminuyendo momento angular del agujero negro

Al introducir esta constante de esta manera (semiclásica) se puede dar una aproximación a la información perdida en un agujero negro, y el cálculo de la constante η implica un estudio de manera completamente cuántica y tiene otras implicaciones como la radiación de Hawking y la teoría gravitacional cuántica. Por lo tanto, en este caso, las disciplinas que se ponen en contacto son la misma TC, la teoría de la información y gracias al estudio semiclásico la introducción de la mecánica cuántica.

Por último, se tiene la tercera ley de la TAN y esta profesa que:

“Es imposible por ningún procedimiento no importando lo idealizado que esté, reducir κ a cero por una secuencia de pasos finitos” (Bardeen, Carter, & Hawking, 1973)

Y la tercera ley de la TC indica que:” no se puede quitar todo el calor de un cuerpo”, que implica que su temperatura no se puede reducir al cero absoluto.

Los lugares comunes de estas dos leyes son las condiciones de frontera, es decir que hay un límite donde las leyes de la física se cumplen, para el caso de la TAN este límite está en relación con el momento angular, a medida que se le añade masa (partículas) aumenta y actúa una fuerza centrífuga sobre el agujero negro que reduce su gravedad de superficie, pero el momento angular no puede aumentar infinitamente ya que en un radio crítico como lo es $\frac{J}{M^2} = 1$ la gravedad de superficie es cero y el agujero negro “desaparecería”, pero no tiene sentido lógico que se le agregue materia al agujero negro y este aumente su masa y que de manera paralela su gravedad de superficie disminuya por lo tanto queda explicada la condición de frontera.

Resumiendo, se tiene el siguiente cuadro comparativo

Ley No.	Ley de la TAN	Ley de la TC	Lugar en común	Otras implicaciones
Primera	$\begin{aligned} dM &= \frac{\kappa}{8\pi} dA + \Omega_H dJ_H + \int \Omega dJ \\ &+ \int \bar{\mu} dN + \int \bar{\theta} dS \end{aligned}$	$dE = T dS + PdV$	Principio de conservación	Gracias a la ecuación de la relatividad especial $E = mc^2$, la masa y la energía son equivalentes en un agujero negro.
Cero	La gravedad de	Si dos cuerpos por	Estado de	En estudio

	<i>superficie de un agujero negro estacionario es constante sobre toda la superficie</i>	<i>separado A y B están en un equilibrio térmico con un tercer cuerpo C, entonces los cuerpos A y B están en equilibrio térmico entre sí</i>	equilibrio	
Segunda	$dA \geq 0$	$dS \geq 0$	Variable física descrita por una función monótonamente creciente	La entropía de un agujero negro se mide en función a la información que se tiene de este y está relacionada con el área del horizonte de sucesos.
Tercera	<i>Es imposible por ningún procedimiento no importa lo idealizado que esté, reducir κ a cero por una secuencia de pasos finitos</i>	<i>No se puede quitar todo el calor de un cuerpo.</i>	Condiciones de frontera	En estudio

Tabla 4 Cuadro comparativo entre las leyes de la TAN y la TC

Como se mencionó en una sección del marco teórico, existen los cambios de paradigma globales y los cambios de paradigma locales, y en el caso de la TAN este es local, tampoco implica en una renovación de una teoría, o la complementación de los paradigmas previos cuyas falencias resuelva la TAN. El cambio de paradigma radica en la implementación de conceptos de la TC en la solución de Kerr-Neuman que está enmarcada en el paradigma de la relatividad general y cómo este estudio termodinámico trae consigo análisis semiclásicos y cuánticos.

6 CONCLUSIONES.

Como se pudo ver en el apartado anterior, sin la contextualización histórica y conceptual no se hubiese podido llegar a la comprensión de los lugares comunes entre la TAN y la TC que llevó a la comprensión del cambio de paradigma y esto se hizo usando el ejercicio metacognitivo.

El ejercicio metacognitivo me permitió aprender y conocer sobre una temática de la cual solo sabía por videos sobre divulgación científica y documentales sobre agujeros negros, y en el momento de terminar este trabajo entiendo de manera más profunda y pude resolver varias dudas que tenía sobre el tema. El ejercicio es un método de estudio que puede hacer más eficiente el aprendizaje ya que hay un control que permite hacer un seguimiento del proceso.

Debido al ejercicio metacognitivo se logra explicar el cambio de paradigma el cual está en el estudio termodinámico de los agujeros negros y la introducción de un estudio semiclásico a estos. Y eso es similar a lo que sucedió con el surgimiento de la mecánica cuántica donde gracias a un estudio termodinámico de un cuerpo negro se llega a la catástrofe del ultravioleta que requiere un estudio completamente distinto como lo fue la mecánica cuántica, de esta misma manera el estudio semiclásico conlleva la introducción de constantes cuánticas en la TAN cómo se vio en el desarrollo de la analogía entre ambas segundas leyes; un estudio completamente cuántico trae consigo la radiación de Hawking y las teorías de gravedad cuántica.

7 BIBLIOGRAFÍA

- (24 de Abril de 2021). Obtenido de HyperPhysics Concepts: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/imgmod/uvcatas.gif>
- Aiello, M. (2010). *Teorías de Gravedad, Propiedades Termodinámicas Irreversibles*. Buenos Aires; Argentina: Universidad de Buenos Aires.
- Alzate, O. E., Alzate, V. C., & Londoño, D. M. (2019). Análisis metacognitivo en estudiantes de básica, durante la resolución de dos situaciones experimentales en la clase de Ciencias Naturales. *Revista Colombiana de Educación*, 117-141.
- Arenas, J. S. (2014). *Termodinámica de Agujeros Negros: Introducción a la concepción de la entropía de acuerdo a la segunda ley generalizada*. Bogotá; Colombia: Universidad Pedagógica Nacional.
- Arndt, C. (2001). *Information measures: Information and its Description in Science and Engineering*. Berlin: Springer.
- Bardeen, J. M., Carter, B., & Hawking, S. W. (1973). The Four Laws of Black Hole Mechanics . *Communications in Mathematical Physics* , 161-170.

- Bekenstein, J. D. (1973). Black Holes and Entropy. *Physics Review*, 2333-2346.
- Chu, J. (1 de Julio de 2021). *Massachusetts Institute Tecnology* . Obtenido de MIT News: <https://news.mit.edu/2021/hawkings-black-hole-theorem-confirm-0701>
- Flavel, J. H. (1979). Metacognition and Cognitive Monitoring. *American Psychologist*, 906-911.
- Frolov, V., & Novikov, I. D. (1997). *Black Hole Physics: Basic Concepts and New Developments* . Berlin : Srpinger.
- Gamow, G. (2010). *Biografía de la Física*. Madrid : Alianza Editorial.
- García Castañeda, M., & Ewert De-Geus, J. (2008). *Introducción a la Física Moderna*. Bogotá: Unilibros.
- Hájíček, P. (2008). *An Introduction to the Relativistic Theory of Gravitation*. Berlin: Springer.
- Hawking, S. W. (1971). Gravitational Radiation from Colliding Black Holes . *Physics Review Letters* , 1344-1346.
- Kuhn, T. S. (1992). *La Estructura de las Revoluciones Científicas*. Bogotá : Fondo de Cultura Económica.
- López, L. Á. (2007). *Termodinámica de Agujeros Negros y la Teoría de la Información*. Bogotá; Colombia: Universidad de los Andes.
- Lüst, D., & Vleeshouwers, W. (2019). *Black Hole Information and Thermodynamics*. Berlin: Springer.
- Misner, C. W., Thorne, K., & Wheeler, J. A. (1971). *Gravitation*. San Francisco : W. H. Freeman and Company.
- Müller, I. (2007). *History of Thermodynamics The Doctrine of Energy and Entropy* . Berlin : Springer.
- Newman, E. T., Couch, E., Chinnapared, K., Exton, A., Prakash, A., & Torrance, R. (1965). Metric of a Rotating Charged Mass. *Journal of Mathematical Physics*, 918 - 919.
- Sánchez Ron, J. (1983). *Origen y Desarrollo de la Relatividad*. Madrid: Alianza Editorial.
- Serway, R. A. (1985). *Física* . México : Mc Graw Hill.
- Smarr, L. (1973). Mass Formula for Kerr Black Holes . *Physical Review Letters* , 71-73.