

AAU

AMERICAN ANDRAGOGY
UNIVERSITY



**ANÁLISIS DE FENÓMENOS
ASTROFÍSICOS**

Por fenómeno entendemos aquellos sucesos o eventos que resultan ser extraordinarios o sorprendentes. También se usa este término para describir aquello de las cosas que hay en la naturaleza, que podemos percibir por los sentidos. En este ensayo ponemos el foco de atención en la descripción de algunos de los fenómenos que presentan un mayor interés y relevancia en la Astrofísica. Son muchos los eventos y procesos físicos interesantes que acontecen en el universo, donde muchos de ellos han podido ser comprendidos y estudiados gracias al avance de la ciencia y la tecnología, cuyos aportes han sido fundamentales para contribuir a descifrar algunos de estos fenómenos. En las siguientes líneas se abordaran temas que en apariencia no tienen ninguna relación entre sí, pero que a medida que se avanza en los temas del compendio, las piezas comienzan a engranar bajo una misma maquinaria y que no es otra que la búsqueda del conocimiento y la comprensión del universo a través del estudio de sus maravillas.

A través de la ciencia, el ser humano se ha propuesto la tarea de buscar el conocimiento real de las cosas. Esto incluye el estudio del cosmos en su totalidad desde lo más pequeño (microcosmos), hasta lo más grande y vasto como lo es el estudio del universo como un todo (macrocosmos). Todo este viaje del conocimiento se realiza poniendo un especial interés en aquellos eventos que de alguna forma han revolucionado nuestro conocimiento acerca del universo y lo más importante: han contribuido a definir la posición y razón de ser del ser humano, inmerso dentro de un universo repleto de maravillas.

1. FENÓMENOS ASTROFÍSICOS Y SU MEDICIÓN

a) Espacio y Tiempo

Desde un punto de vista físico vivimos en un universo inmenso cuyas dimensiones van mucho más allá de la experiencia cotidiana del ser humano. Diariamente millones de personas en la tierra se desplazan de una posición a otra sin darse cuenta que al hacerlo se mueven a través del espacio en el que todos estamos inmersos. Al realizar el movimiento tardamos un cierto intervalo en hacerlo, no se trata de una acción instantánea. Hablar de intervalo nos conduce de manera inevitable al concepto de tiempo. La noción o concepto de espacio surge cuando queremos ubicar la posición de "algo" dentro del entorno que nos rodea. Decimos que ese "algo" ocupa espacio y ese espacio ocupado será grande o pequeño dependiendo de la forma y tamaño que el objeto posea. Para entender el concepto de espacio, introducimos el concepto de medición, la cual es una técnica por la cual asignamos un número a una propiedad física, como resultado de una comparación de dicha propiedad con otra similar tomada como patrón. El espacio se puede definir en base a tres dimensiones físicas: largo, ancho y profundidad. Para ubicar y medir la

posición de un cuerpo en el espacio, tomamos una referencia $(0, 0, 0)$ el cual podemos tomar como un origen de coordenadas y a partir de ella podemos medir su posición, como la distancia existente desde el cuerpo hasta la referencia, esto con respecto a cada una de las dimensiones. El siguiente diagrama ilustra este concepto (Figura 1):

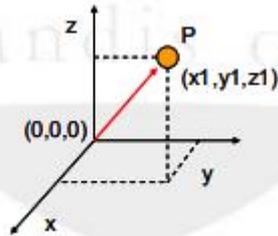


Figura 1. (Posición de un cuerpo en el espacio)

Cada una de estas coordenadas x, y, z mide la distancia que existe desde el punto de referencia $(0, 0, 0)$ hasta donde se encuentra el objeto. Por otro lado si tomamos en cuenta el "momento" que ha pasado desde que un objeto se ha movido desde un punto hasta otro punto, hemos medido entonces el "tiempo" transcurrido de ese objeto para registrar el cambio de posición. De esta manera vemos como la noción de espacio y de tiempo están estrechamente relacionadas, hasta el punto que en nuestro universo se considera el tiempo como una dimensión más, dentro de esta estructura tetradimensional definida por el espaciotiempo. La definición de tiempo que hemos tratado hasta ahora es en realidad la que define un intervalo de tiempo, el cual mide y da sentido al tiempo transcurrido entre dos eventos.

Más difícil resulta definir la esencia de lo que es y de lo que significa el tiempo. Dicho de otra forma, todo el mundo sabe lo que es el tiempo pero nadie puede explicar lo que es. $P(x_1, y_1, z_1)$ $(0, 0, 0)$ $P(x_1, y_1, z_1)$ $(0, 0, 0)$. Desde un punto de vista físico, el tiempo es un fenómeno que se puede medir y que proporciona un sistema de referencia en el que pueden ordenarse los sucesos. Los científicos normalmente utilizan el tiempo como una medida del intervalo que ha ocurrido entre dos sucesos o el tiempo necesario para que ocurra algún proceso. El concepto de distancia lo podemos definir como el espacio que existe entre dos puntos, en el cual uno de ellos sirve como referencia o está referenciado a un sistema de coordenadas. Las unidades en las que medimos la distancia, depende de las proporciones del entorno: metros, kilómetros, año-luz, pársec, megaparsecs, entre otros. El tiempo en física lo medimos como el intervalo que existe entre dos eventos o sucesos. Algunas unidades de tiempo son: segundos, horas, meses, años, décadas,

entre otras. En la Teoría de la Relatividad de Einstein, el tiempo se considera como una cuarta dimensión con sentido de igualdad con las tres dimensiones del espacio. Podemos imaginar todo el espacio y el tiempo representado como un mapa del espacio-tiempo tetradimensional. Sobre este punto volveremos mas adelante.

b) Movimiento de los Astros

El concepto de astro está asociado en general a las estrellas, planetas, asteroides y cometas cuya posición varía en la bóveda celeste. En su desplazamiento a través del espacio, los astros o cuerpos celestes presentan una serie de movimientos que describiremos a continuación:

Rotación

Es el giro de un cuerpo alrededor de su eje, como por ejemplo la rotación diaria de la tierra la cual tiene una duración de 23 horas 56 minutos y 4 segundos.

La rotación es medida habitualmente en relación a las estrellas, denominandose periodo sidéreo de rotación axial. En el ambiente astrofísico, podemos definir otros tipos de rotación dependiendo de la naturaleza de los cuerpos:

Rotación Diferencial: Se produce en un cuerpo no sólido como las estrellas en el que diferentes partes de la misma, giran a velocidades distintas. Las estrellas y las atmósferas planetarias rotan diferencialmente. En el caso del Sol, las regiones ecuatoriales rotan un 25% más rápido que las regiones polares. También se presenta rotación diferencial en los planetas gaseosos, los sistemas de anillos de Saturno y los discos de acreción a las estrellas.

Rotación Galáctica: Es la rotación sistemática de estrellas y gas alrededor de una galaxia. La rotación es más evidente en galaxias espirales y lenticulares, pudiendo ser observada también en muchas galaxias elípticas e irregulares. La rotación mantiene firme a la estructura de la galaxia frente a un mayor colapso gravitacional.

Rotación Síncrona: Situación en la que un satélite rota entorno a su eje en el mismo tiempo que invierte en orbitar un planeta, manteniendo así la misma cara girada hacia el planeta. Este fenómeno está presente en La Luna y es una consecuencia de la acción de las mareas.

Traslación

El fenómeno de translación se define como el movimiento de un cuerpo que orbita alrededor de otro (por ejemplo la Tierra alrededor del Sol). Cuando se mide el tiempo transcurrido por el cuerpo en describir una órbita completa de 360 grados, se obtiene el período orbital del cuerpo.

Precesión

Es el movimiento de balanceo de una peonza en rotación o giroscopio en el que el eje de rotación barre gradualmente un cono. La Tierra en rotación experimenta una lenta precesión debido a las atracciones gravitacionales combinadas del Sol, la Luna y los planetas. El polo de la Tierra invierte 25.800 años en describir un círculo completo sobre la esfera celeste. Este círculo tiene como radio el eje de inclinación de la Tierra (23,5 grados).

Nutación

Este fenómeno consiste en la oscilación periódica del polo de la Tierra alrededor de su posición media en la esfera celeste, debido a las atracciones del Sol y de la Luna en el abultamiento ecuatorial de la Tierra. Provoca una pequeña variación periódica de las posiciones de las estrellas. La máxima oscilación tiene una amplitud de más o menos 9" y un período de 18,6 años. Se presentan algunas oscilaciones mucho menores con período de solo unos pocos días.

Velocidad Orbital

Es la velocidad que tiene un objeto en un punto particular de su órbita. En órbitas elípticas la velocidad del objeto cambia continuamente de acuerdo con la segunda ley de Kepler. La velocidad de un objeto define no solo la aceleración sino también la dirección del movimiento. Para el caso de una órbita circular la velocidad del objeto es siempre perpendicular al radio vector. Si el objeto se mueve a una velocidad mayor, entrará en una órbita elíptica.

Velocidad Angular (ω)

Se define como el ritmo de rotación de un cuerpo, tanto alrededor de su propio eje como en su órbita alrededor de otro cuerpo. Como ejemplo, la Tierra rota con una velocidad angular entorno a su propio eje, pero también tiene una velocidad angular en su movimiento alrededor del Sol.

Velocidad Espacial

Es la velocidad de una estrella u otro cuerpo celeste relativo al Sol. Esta velocidad se determina a partir de las medidas de la velocidad radial y de la velocidad tangencial de la estrella o cuerpo celeste. .

Velocidad Radial

Es la velocidad de un objeto astronómico en la dirección que une ese objeto con la tierra o el Sol, según cual tomemos como referencia. Esta velocidad se mide comparando longitudes de onda (λ) de las líneas del espectro del objeto, con respecto a sus valores de líneas en el laboratorio. Las velocidades que se alejan de nosotros son positivas (+) mientras que las que se acercan a nosotros son negativas (-). Si se aleja, el

desplazamiento de líneas es hacia el rojo, en cambio si se acerca, el desplazamiento es hacia el azul.

Velocidad Tangencial

Es la componente de velocidad de una estrella que es perpendicular a la línea que une a la estrella con el observador o sitio de referencia (tangente). Se conoce también con el nombre de velocidad transversal. La velocidad tangencial se puede calcular a partir del movimiento propio observado del astro y de la distancia medida al observador. La figura 2 muestra las componentes radial y transversal de la velocidad espacial v .
Figura 2.

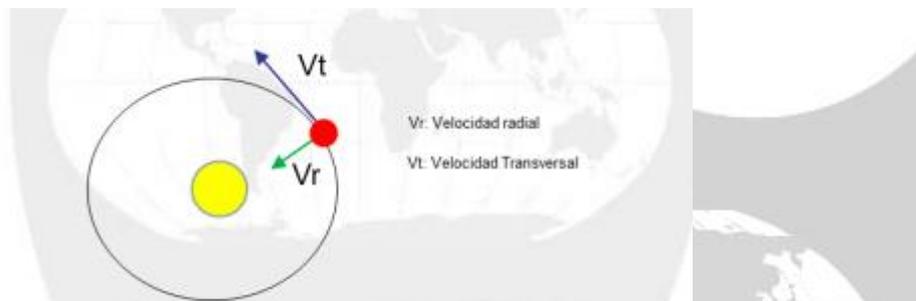


Figura 2. Velocidad radial y transversal de un cuerpo

c) Campo Magnético

Región del espacio que rodea a un imán o donde existan corrientes eléctricas que ejercen una fuerza sobre un objeto magnético. El campo magnético es una manifestación del electromagnetismo, la cual es una de las cuatro fuerzas fundamentales de la materia. El magnetismo al igual que la gravedad, tiene largo alcance y existen campos magnéticos asociados a planetas, estrellas, galaxias, cúmulos de galaxias y cuásares. Estos campos desempeñan un papel importante en muchos procesos astronómicos.

Campo Magnético Galáctico

Es aquel que existe en el espacio interestelar del disco de una galaxia. Su intensidad está en el orden de 10^{-9} Teslas y su patrón de líneas sigue la estructura en espiral de la galaxia. En el caso de galaxias elípticas, es mucho más tenue y difícil de estimar aunque puede llegar a 10^{-7} Teslas en galaxias elípticas que son potentes emisores de radio.

Campo Magnético Intergaláctico

Es un campo magnético débil de unos 10^{-12} Teslas que se cree está presente en el espacio entre las galaxias. Este campo intergaláctico puede haber surgido espontáneamente en las etapas tempranas del universo o por los efectos de las partículas atómicas y los campos magnéticos de

las fuentes de radio cósmicas. Este campo podría llegar a ser unas diez veces mayor en los cúmulos de galaxias (campo magnético intracúmulo).

2. MECÁNICA NEWTONIANA

También llamada Mecánica Clásica, consiste en el estudio de las leyes físicas basadas en las tres leyes del movimiento de Isaac Newton. Estas leyes son las siguientes:

1. Todo cuerpo continúa en estado de reposo o de movimiento uniforme a lo largo de una línea recta, a menos que sea obligado a cambiar ese estado porque una fuerza actúa sobre él (Ley de Inercia).
2. El cambio de movimiento es proporcional a la fuerza ejercida y está en la dirección de la línea recta en la que la fuerza se ejerce.
3. A cada acción se opone siempre una reacción. Dicho de otra manera, las acciones mutuas entre dos cuerpos siempre son iguales y opuestas (Ley de Acción y Reacción).

Estas tres leyes son la base de toda la mecánica clásica y que nos ayudan a entender nuestro mundo físico. Estas leyes funcionan muy bien cuando los objetos se mueven a velocidad mucho menor a la velocidad de la luz. Para tratar con objetos que se mueven a muy altas velocidades, cercanas a las de la luz, estas leyes deben modificarse para tener en cuenta el incremento de masa a medida que el objeto se mueve con mayor velocidad. En estos casos se utiliza la mecánica relativista, la cual se deriva de la Teoría de la Relatividad Especial de Einstein. A continuación vamos a estudiar los temas más relevantes de la Mecánica Clásica o Newtoniana. El estudio de la Mecánica Clásica se inicia con la definición de lo que son las magnitudes escalares y vectoriales. Una magnitud escalar es aquella que queda completamente determinada por su magnitud numérica expresada en una unidad conveniente. Otras magnitudes físicas requieren de una dirección además de la magnitud para quedar completamente determinadas. A estas magnitudes se les denomina vectores y son el fundamento del Álgebra Vectorial. Un cuerpo en el espacio puede ser ubicado a través de su posición con respecto a un sistema de coordenadas de referencia. Si tomamos un espacio tridimensional donde el cuerpo tiene coordenadas x , y , z y su vector posición R se define como:

$$\mathbf{R} = xi + yj + zk$$

Donde i, j, k son vectores unitarios de magnitud la unidad y que definen la dirección para cada uno de los ejes de referencia. .

Cinemática de la Partícula

Es el estudio del movimiento que describen los cuerpos cuando se trasladan de una posición (x_1, y_1, z_1) a otra (x_2, y_2, z_2) . En este estudio se definen cantidades muy importantes como son la velocidad y la aceleración. La velocidad se define como una medida tanto de la rapidez con la que se mueve un objeto, como de su dirección. Se trata de una cantidad vectorial y físicamente hablando, se define como el cambio de posición con respecto a un tiempo determinado.

$$v = (x_2 - x_1) / (t_2 - t_1) = \Delta x / \Delta t$$

Si ahora hacemos el límite cuando

$$\Delta t \rightarrow 0 \text{ entonces: } v = dR / dt$$

Esta expresión es la derivada del vector posición R respecto al tiempo. La aceleración se define como el cambio de la velocidad en un tiempo determinado. Es también una cantidad vectorial, por lo tanto queda completamente determinada por una magnitud y un sentido.

$$a = (v_2 - v_1) / (t_2 - t_1) = \Delta v / \Delta t$$

Si ahora hacemos el límite cuando

$$\Delta t \rightarrow 0 \text{ entonces: } a = dv / dt$$

Esta expresión es la derivada de la velocidad v respecto al tiempo.

También la aceleración se puede definir como la derivada segunda de la posición con respecto al tiempo.

$$a = d^2 R / dt^2$$

El movimiento de un cuerpo puede ser rectilíneo, curvilíneo, circular uniforme y no uniforme. Para el estudio del movimiento circular definimos la velocidad angular

$$(\omega)$$

como la variación del ángulo descrito por la partícula u objeto en función del tiempo.

$$\omega = d\theta / dt$$

La relación vectorial entre la velocidad lineal y la velocidad angular es:

$$v = \omega \times R$$

(Las negrillas indican magnitud vectorial) En el movimiento circular también definimos la aceleración angular como el cambio de la velocidad angular con respecto al tiempo.

$$A = d\omega dt \text{ o también } A = d^2\omega dt^2 .$$

Dinámica de una Partícula

La dinámica es el estudio de la relación existente entre el movimiento de un cuerpo y las causas del movimiento que lo produce. Este movimiento se genera como resultado directo de sus interacciones con otros cuerpos que lo rodean. Las interacciones las podemos describir a través de un concepto matemático denominado fuerza. El estudio de la Dinámica es básicamente el análisis de la relación entre la fuerza y los cambios en el movimiento de un cuerpo. Si definimos la masa de un cuerpo como un número que asociamos a cada cuerpo, y el cual se obtiene comparando el cuerpo en estudio con otro cuerpo patrón. Conociendo la masa de un cuerpo podemos definir el momentum lineal como el producto de la masa de un cuerpo, multiplicado por su velocidad.

$$P = m \cdot v$$

El momentum lineal es una cantidad vectorial y tiene la misma dirección de la velocidad. Se trata de un concepto físico de mucha importancia, porque combina los dos elementos que caracterizan el estado dinámico de una partícula. Dado un sistema de partículas, el principio de conservación del momentum dice que "El momentum total de un sistema de partículas es constante".

$$P = \sum p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n = cte.$$

Conociendo el concepto de momentum y observando sus variaciones temporales tenemos que:

$$F = \Delta P \Delta t$$

Si tomamos $\lim \Delta t \rightarrow 0$

$$\text{entonces: } F = dP dt$$

Sustituyendo $P = m \cdot v$

en la fórmula tenemos:

$F = d(m \cdot v) dt$ y si la masa es constante tenemos

$F = m dv dt$ resultando que:

$$F = m \cdot a$$

Resulta la conocida ecuación que nos indica que la fuerza es igual a masa por aceleración, siempre y cuando la masa sea constante. La unidad de fuerza es el Newton. En Astrofísica es muy importante el concepto de momentum angular L , el cual se define como:

$$L = R \times P . L$$

define como cambia el momentum lineal de una partícula en magnitud y dirección mientras esta se mueve.

Al igual que el momentum lineal, el momentum angular se conserva (Teorema de Conservación del Momentum Angular-TCMA). Siguiendo nuestro recorrido por los conceptos fundamentales de la mecánica newtoniana, encontramos la definición de Trabajo Mecánico, el cual se define como:

$$W = \int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{R}$$

El trabajo mecánico es una cantidad escalar La potencia mecánica la definimos como el trabajo efectuado por unidad de tiempo: $P = \frac{dW}{dt}$ El Trabajo se expresa en joules y la Potencia en watts. Un concepto muy importante en física es el concepto de energía. La Energía Cinética (K) se define como aquella energía que está asociada al movimiento de un cuerpo.

$$K = \frac{1}{2} m v^2$$

Donde m es la masa y v la velocidad de la partícula. La Energía Potencial (Ep) es una función de las coordenadas, tal que la diferencia entre sus valores de posición inicial y final es igual al trabajo efectuado para mover la partícula, desde su posición inicial hasta la posición final. Por definición, la energía potencial Ep es igual a:

$$E_p = -\int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{R}$$

La energía potencial es una energía que depende de la naturaleza de la fuerza F. Las fuerzas que satisfacen la condición dada en la definición de la Ep son las fuerzas conservativas. La fuerza de gravedad es una fuerza conservativa y por lo tanto la energía potencial debida a la gravedad es:

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

Donde m es la masa de la partícula, g es la aceleración de gravedad y h es la altura sobre la superficie y en el caso de la Tierra, sobre el nivel del mar. La energía total del sistema se obtiene como la suma de las componentes cinética y potencial de la partícula.

$$E_t = K + E_p = \frac{1}{2} m v^2 + E_p(x, y, z)$$

Cuando las fuerzas son conservativas, la energía total (Et) de la partícula se conserva. Las leyes de la mecánica estudiadas para una partícula son válidas para el caso de un sistema de partículas, siendo este último muy importante en astrofísica. .

3. GRAVITACIÓN

La interacción gravitatoria es una de las cuatro interacciones conocidas y resulta ser la más débil de todas estas:

- Interacción Nuclear Fuerte
- Interacción Nuclear Débil
- Interacción Electromagnética
- Interacción Gravitacional

La descripción de las interacciones en la naturaleza nos conduce a introducir el concepto de campo. Por campo entendemos una propiedad física que se extiende sobre una región del espacio y que se describe por una función de la posición y el tiempo. Las interacciones se describen por medio de campos, aún cuando no todos los campos corresponden necesariamente a interacciones.

A escala del universo el campo gravitacional resultante de las interacciones entre los cuerpos celestes, constituye la interacción dominante por encima de los otros tres tipos de interacción.

A continuación estudiaremos la interacción gravitatoria desde el punto de vista newtoniano y posteriormente el einsteniano, que no es otro que el propuesto en la Teoría de la Relatividad General.

Gravitación Newtoniana

La interacción y movimiento de los cuerpos celestes, sobre todo de nuestro sistema planetario, ha sido motivo de estudio y de curiosidad desde los albores de la civilización. Los antiguos griegos, Nicolás Copérnico y Tycho Brahe hicieron importantes aportes desde la antigüedad hasta que Johannes Kepler descubrió las leyes del movimiento planetario o "Leyes de Kepler", las cuales describen la cinemática del movimiento planetario:

- a) Los planetas describen órbitas elípticas, estando el Sol en uno de sus focos.
- b) El vector posición de cualquier planeta con respecto al Sol, barre áreas iguales en tiempos iguales (Ley de las Áreas).
- c) Los cuadrados de los períodos de revolución son proporcionales a los cubos de las distancias promedio de los planetas al Sol.

$$P^2 \propto A^3$$

Posteriormente a la formulación de estas leyes, en 1687 Sir Isaac Newton publicó en su libro "Philosophiae Naturales Principia Mathematica" su importante Ley de gravitación Universal:

$F = G \cdot (M \cdot m / R^2) \cdot \mathbf{ur}$.13 Donde G es la cte. de

gravitación universal

$(6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{Kg}^2)$,

M es la masa mayor,

m es la masa menor,

R es la distancia de la separación entre ambas masas y

\mathbf{ur} es el vector unitario que indica la dirección de la fuerza de atracción gravitacional.

La ley de gravitación entre dos cuerpos puede expresarse por una fuerza de atracción central proporcional a las masas de los cuerpos e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa.

Bajo el efecto de la interacción gravitacional los cuerpos celestes se mueven describiendo órbitas que dependen tanto de la velocidad del cuerpo, de la distancia y de las masas de ambos cuerpos que interactúan.

En forma general las órbitas pueden ser no solo elípticas sino también parabólicas o hiperbólicas, siendo la órbita circular un caso particular de la órbita elíptica. En el caso del Sistema Solar, la presencia de otros planetas introduce perturbaciones en la órbita de los demás planetas.

Actualmente estas perturbaciones se pueden calcular con exactitud, mediante técnicas que constituyen la ciencia llamada Mecánica Celeste.

Para el caso de sistemas planetarios la intensidad del campo gravitacional producida por una masa M, señala siempre hacia la masa que lo produce.

En el caso del Sistema Solar, el campo que este ejerce sobre todos los planetas, apunta siempre hacia el centro del Sol. Para un sistema de partículas donde no necesariamente exista una masa central dominante, el campo gravitacional resultante en un punto P, se obtiene como la sumatoria de todos los campos gravitacionales sobre el punto

$$\mathbf{P} \cdot \mathbf{GP} = G_1 + G_2 + G_3 + \dots \quad G_i = \sum (m_i / r_i^2) \mathbf{ur}_i$$

Un campo gravitacional se representa gráficamente a través de líneas de fuerza que surgen del punto bajo medición y que apunta hacia la masa que produce el campo. El caso mas general de campo gravitacional surge cuando el campo es producido por una masa no puntual y por lo tanto el cálculo de dicho campo requiere de la introducción de algún factor geométrico, que tome en cuenta la distribución de masa que produce el campo, la cual puede ser o no ser uniforme.

Para el caso general de interacción gravitacional entre dos cuerpos esféricos, homogéneos, depende solamente de la distancia entre sus centros.

Cerramos este estudio de la gravitación newtoniana mencionando el Principio de Equivalencia el cual dice que "Todos los cuerpos situados en el mismo lugar en un campo gravitacional, experimentan la misma aceleración". Gravitación Einsteiniana Albert Einstein explicó la ley de la inversa del cuadrado como un resultado de la forma en que se distorsiona el espacio-tiempo por la presencia de materia. Su Teoría de la Relatividad General va más lejos que la teoría de gravedad de Newton y la incluye dentro de si misma. La Teoría de la Relatividad General fue presentada en 1915 y nos presenta una imagen física de cómo trabaja la gravedad a través de una descripción geométrica de sucesos que tienen lugar en un espacio-tiempo tetradimensional.

La teoría explica que en presencia de campos gravitatorios extremadamente intensos, la materia distorsiona el espacio curvándose hasta el punto de desviar la luz por efecto de la gravedad.

La Teoría de la Relatividad General hace muchas predicciones las cuales han sido comprobadas experimentalmente. Estas incluyen la curvatura de luz, el desplazamiento hacia el rojo gravitatorio y la dilatación del tiempo gravitatoria. Esta teoría llamada también "Teoría de la Gravitación" es una descripción buena y precisa del comportamiento de la materia en el universo y de la relación entre espacio, tiempo y materia. La curvatura que experimenta el espacio-tiempo por efecto de la gravedad, hace que la línea mas corta entre dos puntos no sea la línea recta. También la curvatura de la luz cerca de las masas gravitatorias, hace que el tiempo transcurra más despacio en ese lugar.

La Teoría de la Relatividad General se resume en una ecuación denominada "Ecuación del Campo de Einstein". Esta ecuación indica que la curvatura del espacio-tiempo está determinada por la materia y la energía. Esta ecuación se subdivide en un conjunto de 10 ecuaciones separadas, cuya solución es de extrema dificultad. Hasta el momento se han obtenido pocas soluciones exactas. La ecuación de campo de Einstein es una poderosa herramienta utilizada por los astrofísicos para calcular de manera exacta el movimiento de las galaxias y sus interacciones gravitatorias.

Obtener resultados a partir de esta ecuación no es una tarea fácil. Los trabajos de Karl Schwarzschild utilizando la ecuación de campo de Einstein con las estrellas, le permitió establecer dos artículos sobre la geometría del espacio-tiempo alrededor de las estrellas. En pocos años la geometría de Schwarzschild se convirtió en un estándar de uso por físicos

y astrofísicos. Entrar en detalles sobre la ecuación de campo de Einstein va más allá de los objetivos planteados en el presente ensayo.

4. ÓPTICA Y RADIACIÓN

Un Universo de Radiación

Vivimos en un universo de radiación. Esta está presente en todos los rincones del universo donde existe materia bariónica capaz de producirla. La gran mayoría de la información y el conocimiento que tenemos sobre el universo nos llega a través de algún tipo de radiación particular. La radiación es energía que se propaga en forma de ondas electromagnéticas o fotones. También es llamada así a la corriente de partículas formada por protones y electrones. El estudio de la radiación electromagnética tiene un interés especial en astrofísica, debido a que es la fuente portadora de gran parte de la información que tenemos actualmente sobre el universo. La radiación electromagnética que se propaga a través del universo hasta alcanzar nuestros sistemas detectores (telescopios), es una forma de radiación donde la energía es transportada por campos eléctricos y magnéticos oscilantes, los cuales viajan juntos a través del espacio a la velocidad de la luz. La radiación electromagnética es generada por la aceleración de una carga eléctrica que genera un campo eléctrico variable, el cual a su vez genera un campo magnético variable. Fue en el siglo XIX cuando el físico James Clerk Maxwell desarrolló un conjunto de ecuaciones que describen el comportamiento de los campos.

Todas las ecuaciones incluyen la constante "c" que es la velocidad de la luz en el vacío. El estudio de los campos electromagnéticos así como de los sistemas de fuerzas involucradas, son las bases de la Teoría Electromagnética y la Electrodinámica. La velocidad de propagación de los campos E (eléctrico) y H (magnético) y por ende la velocidad de la onda electromagnética, es la velocidad de la luz c en el vacío. Cuando la onda atraviesa un medio material, la velocidad de propagación disminuye, siendo esta velocidad menor que la de la luz y característica del medio físico en particular. Las ondas se caracterizan por tener una "Longitud de Onda" (λ), una "frecuencia" (f) y están relacionadas por la ecuación $c = f \cdot \lambda$. La radiación electromagnética se puede considerar también desde el punto de vista cuántico como un chorro de partículas de masa cero llamadas fotones. La energía de un fotón está relacionada con la frecuencia de la radiación a través de la fórmula de Planck $E = h \cdot f$. Donde h es la constante de Planck y f es la frecuencia de la oscilación. La fórmula de Planck nos dice que a una mayor frecuencia, es mayor la energía de la radiación. La radiación electromagnética puede ser de origen térmico o no térmico. La radiación de origen térmico es la emitida por un cuerpo negro, el cual es un objeto ideal que se comporta como un

absorbente perfecto de radiación y también un emisor perfecto en todas las longitudes de onda. Un cuerpo negro tiene un espectro característico de radiación, el cual nos presenta un pico o máximo que solo depende de la temperatura del cuerpo. El espectro de un cuerpo negro se describe a través de la Ley de Planck, donde el pico se desplaza hacia longitudes de onda más cortas, al aumentar la temperatura del cuerpo negro. $B_f(\lambda) = \frac{2 \cdot h \cdot f^3 \cdot c^2}{15 \cdot \pi^5 \cdot k^4 \cdot T^4} \cdot \frac{1}{e^{(hf/kT)-1}}$ Donde h es la constante de Planck ($6,62 \times 10^{-34} \text{Kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), k es la constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1}$), f es la frecuencia y c es la velocidad de la luz. .16 La radiación de fondo cósmico de microondas en la ventana de radio, así como las estrellas en la ventana óptica del espectro electromagnético, se comportan como emisores de radiación muy similares a la radiación de un cuerpo negro.

Diagrama de cuerpo negro (Fuente: www.laplace.us.es) Es importante mencionar la Ley del Desplazamiento de Wien, la cual relaciona la longitud de onda (λ), con el pico de emisión del cuerpo negro y con la temperatura (T). A bajas temperaturas el pico se encuentra en la región infrarroja. A medida que T sube el pico va pasando por la región visible y continua hacia el ultravioleta y más allá hacia los niveles de radiación más energéticos. La Ley de Wien se obtiene a partir de la Ley de Planck cuando $\lambda = \lambda_{max}$ y $hc/\lambda kT$ es mucho mayor que 1. Entonces se obtiene la expresión: $B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{5 \lambda^5} \cdot e^{-hc/\lambda kT}$ La radiación no térmica es debida a otras causas no relacionadas con la temperatura del cuerpo emisor. Este tipo de radiación tiene un espectro diferente al espectro de radiación del cuerpo negro. Como ejemplos de este tipo de radiación tenemos la radiación Sincrotrón, la radiación Maser y otras señales de radio artificiales (radio, TV, entre otras). La radiación electromagnética presenta diferentes características dependiendo de la longitud de onda o la frecuencia de oscilación. A continuación se muestra la Tabla 1, donde aparecen las diferentes regiones del espectro desde las regiones de menor energía (radio), de longitud de onda más larga y menor frecuencia, hasta las más energéticas (rayos gamma). Región Espectral Rango Emisión Absorción Radio >1mm Sincrotrón, Bremstrahlung, HI, HII Ondas Submilimétricas 300µm – 1mm Sincrotrón, Bremstrahlung, HI, HII, polvo Infrarrojo lejano (25-300) µm HII, Protoestrellas, polvo Polvo Infrarrojo medio (7-25) µm Polvo estelar, estrellas IR, protoestrellas Polvo Infrarrojo Cercano (0,8-7)µm Gigantes rojas, Supergigantes, Protoestrellas Polvo Óptico (3.300-8.000)Å Emisión estelar poblaciones I y II Polvo, metales Ultravioleta (2.000-912)Å Poblaciones I y II, Lyman α, nebulosas Polvo, metales, iones Rayos X blandos 0,1 < KT < 3keV Estrellas Sec. principal, medio interestelar Polvo Rayos X duros 3 < KT < 500keV Binarias Rx, AGN, medio interestelar caliente Rayos Gamma KT > 500keV Estallidos Ry, partículas energéticas Tabla 1. Espectro

electromagnético. .17 Óptica La Óptica como ciencia es la rama de la física que estudia la luz. En este caso definimos "luz" como una radiación que es capaz de afectar a la retina del ojo humano. Como vimos en el tema de radiación, la luz visible ocupa una ventana bastante estrecha dentro del espectro electromagnético y este va desde los 3.900 nm hasta los 7.800 nm. La óptica trata sobre los fenómenos luminosos y la visión, incluyendo el diseño de instrumentos ópticos. Actualmente el campo de la óptica incluye en su estudio, tanto el espectro visible como el infrarrojo y el ultravioleta, debido a la similitud de comportamiento entre estas regiones. El estudio de la luz se puede abordar bajo dos enfoques distintos, pero que se consideran complementarios para entender en forma adecuada el fenómeno de la luz y como esta se propaga y se comporta en la naturaleza. Las dos teorías que explican la naturaleza y el comportamiento de la luz son la Teoría Ondulatoria y la Teoría Corpuscular de la luz (Figura 4). Figura 4. Teorías que explican el comportamiento de la luz. Teoría Ondulatoria de la Luz Desarrollada por Christian Huygens (1629–1695) inicialmente y luego perfeccionada por Thomas Young (1773–1829) y por Augustin Jean Fresnel (1788-1827). Estos estudios constituyeron la base para el desarrollo de la "Teoría Ondulatoria Electromagnética Clásica" de la luz, la cual fue formulada por James Clerk Maxwell (1831-1879). Esta teoría está basada en los principios básicos de la electricidad y del magnetismo. Para entender el comportamiento de la luz se hace uso de la "Óptica Geométrica", la cual considera que la luz se propaga en línea recta y permite visualizar el haz de luz como "rayos" rectilíneos que se propagan en el vacío, hasta que consiguen un obstáculo o medio físico que los desvían o los absorben total o parcialmente. Haciendo uso de la óptica geométrica es posible estudiar las propiedades de reflexión y refracción de la luz. La reflexión de la luz se produce de acuerdo con las leyes experimentales conocidas desde la antigüedad por los científicos griegos y egipcios. Primera Ley de la Reflexión: El rayo reflejado se encuentra en el plano que contiene el rayo incidente y la normal a la superficie reflectora en el punto de incidencia. Segunda Ley de Reflexión: El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, siendo el ángulo de incidencia el comprendido entre el rayo incidente y la normal.

El ángulo de reflexión es el ángulo entre el rayo reflejado y la normal. La refracción de la luz es el fenómeno de desviación que experimenta el rayo de luz al pasar de un medio físico a otro de distinta densidad. Primera Ley de la Refracción: El rayo refractado se encuentra en el plano que contiene el rayo incidente y la normal a la superficie divisoria en el punto de incidencia.

Segunda Ley de la Refracción: La razón del seno del ángulo de incidencia al seno del ángulo de refracción es una constante que es independiente

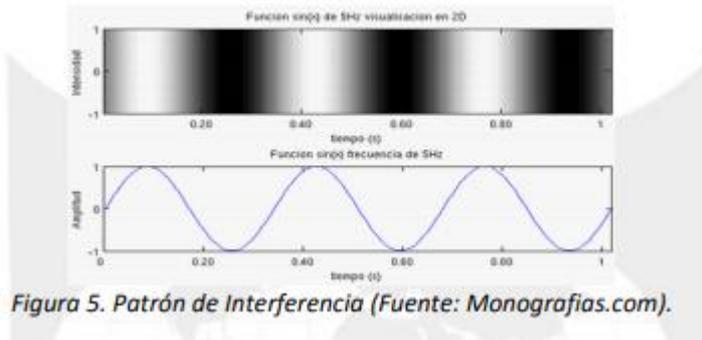
del ángulo de incidencia. Los ángulos de incidencia y de refracción se miden a partir de la normal. Tercera Ley de la Refracción: La trayectoria de un rayo refractado en la superficie divisoria de dos medios transparentes es exactamente reversible. En el fenómeno de refracción se define la cantidad (n) como el índice de refracción relativo del agua respecto al aire.

La primera y tercera leyes de la refracción fueron conocidas por los griegos y los egipcios. La segunda ley de refracción es conocida como la Ley de Snell, la cual se dedujo a partir de las propiedades ondulatorias de la luz. El Principio de Fermat del tiempo mínimo indica que la trayectoria recorrida realmente por la luz al viajar de un punto a otro, es aquella trayectoria para la cual el tiempo invertido en la transmisión es mínimo, comparado con el invertido en recorrer otras trayectorias vecinas. Un rayo luminoso experimenta el fenómeno de dispersión de la luz, el cual consiste en la separación de esta en sus longitudes de onda componentes o colores espectrales.

El color se define como las diferentes sensaciones que la luz produce en el ojo. Los colores dependen de la frecuencia de la onda electromagnética. El espectro o ventana óptica va desde el rojo (mayor λ) hasta el violeta (menor λ). En el proceso de propagación el haz luminoso en su viaje a través del espacio, resulta afectado ante la presencia de obstáculos materiales, los cuales pueden resultar transparentes, semi-transparentes u opacos. Como resultado de esta interacción, la luz se desvía, siendo absorbida parte de su energía en longitudes de onda específicas. Esto produce una disminución de energía radiante para una fuente, a partir de este punto del espacio.

La luz experimenta el fenómeno de "Difracción" doblandose levemente alrededor del borde de un obstáculo que esté situado en su camino. Esta es una consecuencia del comportamiento ondulatorio de la luz. Debido a la difracción, una imagen estelar estará constituida por un "Disco Airy," rodeado por varios anillos producidos por difracción de la luz en el borde de la lente o espejo del telescopio. El fenómeno de difracción se observa también en otras longitudes de onda, como por ejemplo en radio.

La luz presenta el fenómeno de "Interferencia" al atravesar una rendija. En este caso dos frentes de onda luminosos pueden combinarse a fin de aumentar la amplitud total (interferencia constructiva) o de disminuirla (interferencia destructiva). De esta forma se obtiene un patrón de interferencia. Para que ocurra la interferencia, las ondas deben ser coherentes, es decir las crestas y los valles deben estar en fase. Si las crestas coinciden entre si, la amplitud total de la onda resultante se incrementa. Si al contrario las crestas coinciden con los valles, la amplitud total disminuye (diferencia de amplitudes).



Se dice que una onda luminosa está “polarizada” cuando vibra en un plano determinado. Cuando una onda no está polarizada, la propagación de los campos eléctrico (E) y magnético (H) están distribuidos por igual en todas las direcciones perpendiculares a la dirección de propagación de la onda.

Cuando la vibración de la onda está confinada a un solo plano, se dice que la luz está polarizada linealmente. Si los picos y los valles de las ondas no están en fase, es decir la luz está desfasada formando un ángulo recto con respecto a la luz de otro plano, entonces la luz está circularmente polarizada. Si ocurren los fenómenos de polarización lineal y circular simultáneamente, se dice que la luz está elípticamente polarizada.

La polarización lineal es causada por difusión. La polarización circular es causada por intensos campos magnéticos.

Teoría Corpuscular de la Luz

La Teoría Corpuscular considera a la luz como una forma de radiación de energía la cual se manifiesta en forma de paquetes o cuantos de energía discretos llamados fotones. Cada uno de estos fotones tiene una energía

$$E = h.f$$

donde como ya se dijo anteriormente h es la constante de Planck y f es la frecuencia de la radiación. Posiblemente presentada por descartes en 1637, la teoría corpuscular establece que la luz está compuesta de pequeñas partículas discretas llamadas “corpúsculos” que viajan en línea recta con velocidad finita. La teoría cuántica moderna desarrollada inicialmente por Max Planck (1858-1947) coincide en considerar la luz como paquetes discretos de energía llamados fotones que se propagan por el espacio a una frecuencia f.

Los fotones además de poseer energía, poseen momentum o cantidad de movimiento. .

$$20 P = h \cdot f \quad c = h \lambda$$

Actualmente se considera que la radiación electromagnética presenta propiedades cuánticas (corpúsculares), así como propiedades ondulatorias. Dentro de las propiedades cuánticas de la luz que no pueden ser explicadas por la teoría ondulatoria, encontramos los espectros de absorción y de emisión. La intensidad de radiación emitida por una fuente no es la misma para todas las longitudes de onda. Un espectro es la representación de la energía radiante por unidad de tiempo en función de la longitud de onda (λ) o de la frecuencia (f).

Experimentalmente los espectros se estudian por medio de instrumentos denominados espectrógrafos. Un espectrógrafo es un dispositivo que dispersa la luz y que cuenta con una escala de precisión para medir la frecuencia o la longitud de onda dispersada. De la dispersión de la luz se obtienen rayas, líneas o bandas espectrales, las cuales son características específicas de una determinada fuente emisora. Cuando el espectro es producido al dispersar la luz procedente de una fuente, tenemos un espectro de emisión.

Este espectro está determinado por la composición y estado físico de la fuente que lo emite. Otro tipo de espectro es el de absorción, el cual presenta líneas o bandas oscuras cuando la luz de una fuente atraviesa un gas absorbente, cuyos átomos o moléculas del gas absorben la luz en longitudes de onda específicas. Los espectros continuos son producidos por sólidos y líquidos incandescentes así como por gases bajo presión y temperaturas muy elevadas.

Estos espectros contienen luz de todas las frecuencias. El estudio cuántico de la radiación electromagnética nos lleva no solo al rango visible, sino que también se extiende a otras ventanas del espectro electromagnético. Así tenemos las siguientes series de líneas espectrales las cuales llevan el nombre de sus descubridores (Tabla 2):

Serie	Rango del Espectro
Lyman	Ultravioleta
Balmer	Visible
Pashen	Infrarrojo
Bracket	Infrarrojo
Pfund	Infrarrojo
Humphreys	Infrarrojo lejano

Tabla 2. Series de líneas espectrales y su rango. Las frecuencias de todas las líneas observadas del hidrógeno atómico están contenidas en las series anteriores.

Los valores energéticos para cualquier átomo, se predicen correctamente por medio de la Mecánica Cuántica formulada por Edwin Schrodinger y Werner Heisenberg en 1925. .21 Específicamente sobre la estructura del átomo de hidrógeno, la teoría de Bohr nos dice lo siguiente:

- a) La energía del átomo solamente puede tener un valor de un conjunto de valores discretos.
- b) En la transición o salto cuántico se emite un solo fotón desde un nivel de energía a otro. Volviendo al estudio de los fotones, la teoría cuántica nos dice que la energía se emite o se absorbe en unidades discretas o cuantos con energía

$$E = h.f.$$

Si se trata de frecuencias bajas como por ejemplo las ondas de radio, la energía es prácticamente indetectable. En el rango óptico los cuantos de luz pueden ser fácilmente detectables con un instrumento sensible, como por ejemplo los sensores o cámaras CCD. En el caso de los Rayos X de alta energía, un cuanto único de radiación puede ser fácilmente detectado por instrumentos detectores de baja sensibilidad. De esta manera se confirma que los procesos de emisión y absorción de energía son realmente procesos cuánticos. El fotón es un cuanto de radiación electromagnética y en el caso de la luz visible y las ondas de radio, la naturaleza corpuscular o discreta no es fácilmente observable como en el caso de altas energías (Rayos X y Gamma).

5. RADIOASTRONOMÍA

La Radioastronomía se define como una disciplina científica que estudia el universo específicamente en la ventana de radio del espectro electromagnético. Este estudio cubre desde las longitudes de onda (λ) métricas (30 mts), hasta las longitudes de onda submilimétricas en la frontera de transición con el infrarrojo lejano. La Radioastronomía comenzó en los años 30 del siglo pasado con los trabajos de Karl Jansky y Grote Reber, aunque no fue sino hasta después de la segunda guerra mundial cuando se establecieron los primeros grupos de investigadores. Dada la naturaleza de las ondas de radio, las observaciones en radiofrecuencia se pueden realizar tanto en el día como en la noche. Los mecanismos de emisión de radio ondas puede ser de origen térmico (radiación de cuerpo negro), así como no térmicos (principalmente emisión sincrotrón y máser). El estudio en radiofrecuencia de las líneas de

emisión y absorción de las moléculas presentes en el medio interestelar e intergaláctico, aporta información muy valiosa sobre las propiedades y naturaleza del universo.

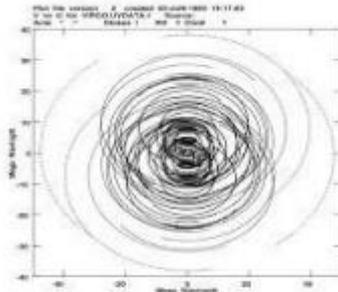
El hidrógeno que en su estado neutro (HI) es el elemento más abundante en el universo, emite en la línea de radio de 21 cm y su estudio permite conocer la estructura tanto de nuestra galaxia como de muchas otras. El Radiotelescopio es el instrumento básico para realizar las observaciones en radio. Este instrumento recoge y registra las ondas de radio procedente de fuentes astronómicas. Un radiotelescopio está constituido por una antena receptora, la cual usualmente es un disco parabólico, un amplificador de señal de bajo ruido y un elemento registrador para el almacenamiento de las observaciones de radio. Los radiotelescopios han ido evolucionando y mejorando su equipamiento conforme avanza la tecnología.

Actualmente son equipos altamente automatizados que hacen uso de tecnología de vanguardia, lo cual ha incrementado la calidad de las técnicas de observación y de los resultados obtenidos de las mismas. Los radiotelescopios dirigidos más grandes tienen un diámetro de 100 mts y en particular el radiotelescopio de Arecibo en la isla de Puerto Rico consiste en un plato fijo que tiene un diámetro de 305 mts. Aún con este gran tamaño, para estas frecuencias estos equipos tienen importantes limitaciones en cuanto a la resolución angular, lo cual nos proporciona imágenes borrosas e imprecisas de las emisiones celestes. Esto es un inconveniente sobre todo cuando queremos obtener información detallada de la estructura y propiedades físicas de las radiofuentes.

A través de la técnica de la radiointerferometría es posible superar las limitaciones de resolución angular impuestas por el uso de un solo radiotelescopio. Los llamados radiointerferómetros consisten en una red de antenas que operan en forma electrónica como un único instrumento de alta resolución angular. Los observatorios de radio modernos como ALMA, VLA, MERLIN y otros, utilizan esta técnica para el estudio de las ondas de radio. Un aspecto muy interesante de la interferometría es que la máxima resolución de la red está determinada por la separación máxima (línea base) de los elementos del sistema (pares). Con este principio es posible obtener resoluciones angulares mejores a 0,001 segundos de arco, lo cual es mucho mejor que las obtenidas con los telescopios ópticos. En este caso la máxima línea de base de una pareja de radio telescopios está en el orden de miles de kms.

Los radiointerferómetros operan utilizando el principio de "Síntesis de Apertura" a fin de conseguir la máxima resolución angular posible. Esta técnica utiliza una red de radiotelescopios para simular un telescopio

único de gran apertura. Los elementos del sistema se conectan en pares donde a medida que la Tierra rota, cada par traza un anillo cuyo diámetro es igual a la separación máxima de los pares. De esta manera el barrido de todos los pares a lo largo de un período de doce horas, proporciona la información necesaria que va llenando un plano llamado (u,v) a partir del cual y a través de complejas técnicas de análisis de datos basadas en Transformada de Fourier, se pueden sintetizar imágenes de radio de alta resolución, dependiendo de la configuración utilizada por el radiointerferómetro. La figura 6 muestra un ejemplo del trazo obtenido



del plano (u,v) . . *Figura 6. El plano (u,v) (Fuente: web.uwa.edu.au).*).

Son muchos los fenómenos y eventos astrofísicos que pueden ser estudiados dentro de la ventana de radiofrecuencias. Esta región ofrece además la oportunidad de observar en múltiples sub-bandas, en las cuales se obtiene información diferente de una misma radiofuente si la observamos en ondas de radio medias, cortas, milimétricas y sub-milimétricas.

La Radioastronomía estudia los siguientes fenómenos y eventos astrofísicos:

- El Sol y los planetas del Sistema Solar. Por su cercanía, el Sol es un potente radio emisor. Júpiter también emite en ondas de radio con notable intensidad.
- Estrellas Novas y remanentes de Supernova
- Regiones (HI) de hidrógeno neutro (21 cms). • Regiones HII (gas hidrógeno ionizado)
- La Vía Láctea y el centro de la Galaxia.
- Quasars • Radiación de fondo de microondas (ondas de 1mm). Descubiertas en 1965.
- Radiogalaxias y núcleos activos de galaxias (AGN). Su emisión puede llegar a los 1038watts lo que es 106 veces mayor que una galaxia normal como la nuestra. Su potente emisión proviene del núcleo de donde surgen

chorros (jets) en direcciones opuestas y presentan un par de lóbulos lejanos mucho más allá de los confines visibles de la galaxia. Usualmente se trata de una galaxia elíptica gigante, cuya fuente de energía se cree que es un agujero negro masivo ubicado en el centro galáctico, de donde se envía energía hacia los lóbulos. Un ejemplo de radiogalaxia en la

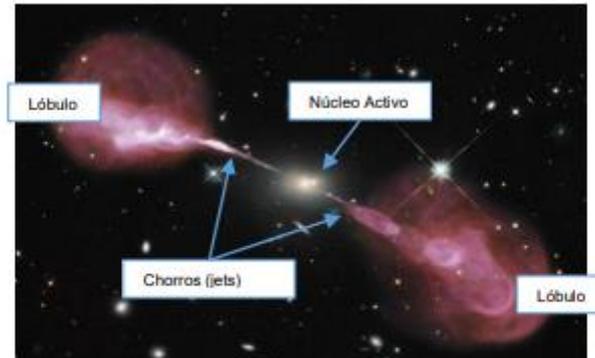


Figura 7 *Figura 7. Radiogalaxia Hercules A y sus partes (Fuente: observatorio.info).* A y sus partes (Fuente: observatorio.info). Lóbulo Núcleo Activo Chorros (jets) Lóbulo .

6. SIMETRÍAS DE ESPACIO Y TIEMPO: LOS PRINCIPIOS DE CONSERVACIÓN

En física, la simetría incluye todos los rangos de un sistema físico en los cuales bajo ciertas transformaciones, aspectos presentes en esos sistemas no cambian ni varían de acuerdo a una observación particular. Es decir, los rasgos del sistema son preservados ante cambios o transformación. La simetría espacio-tiempo se refiere a aspectos relacionados al espacio y al tiempo que pueden ser descritos en forma tal, que exhiben una forma de simetría. El espacio-tiempo es la entidad geométrica en la cual se desarrollan todos los eventos físicos del universo, de acuerdo con la Teoría de la Relatividad General, entre otras teorías físicas. El espacio-tiempo es una descripción en cuatro dimensiones del universo, donde la posición de un objeto se especifica por tres coordenadas en el espacio y una en el tiempo.

De acuerdo a la Teoría de la Relatividad, estas cuatro dimensiones están "unidas" entre sí. La trayectoria de un objeto en el espacio-tiempo llamada "línea del universo", se relaciona a su vez con la curvatura del espacio-tiempo con las posiciones y movimientos de las partículas de materia. La unión del espacio y el tiempo en una totalidad tetradimensional fue propuesta por Hermann Minkowski en el contexto de la Teoría de la Relatividad Especial y fue ampliada posteriormente por Albert Einstein en su Teoría de la Relatividad General. Esta última describe un universo que está bajo la influencia de la gravedad y que considera el espacio-tiempo como una estructura real que puede ser

doblada, estirada y comprimida, la cual puede incluso tener agujeros. La Figura 8 muestra un diagrama de espacio-tiempo-gravedad propuesto por la Teoría de la Relatividad General.

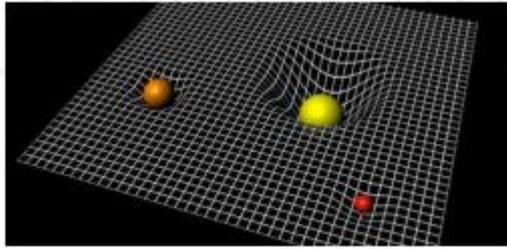


Figura 8. Diagrama espacio-tiempo-gravedad (Fuente: agenciasinc.es).

Siendo la simetría una propiedad universal basada en lo repetitivo, lo que tiende a ser igual, en objetos que por mantener la misma geometría son representativos de otros objetos.

La simetría en el espacio nos indica que todos los puntos donde quiera que se encuentren son equivalentes para la formulación de las leyes de la física. Según esto, no hay puntos privilegiados en el universo, donde las leyes puedan variar o tener un comportamiento distinto.

De aquí tiene relevancia el concepto de isotropía, el cual se refiere a que todas las direcciones espaciales son equivalentes. No hay direcciones donde las leyes físicas funcionen de manera diferente a como funcionan en las restantes direcciones. .

En el caso del tiempo, la uniformidad del tiempo permite que la ocurrencia de los acontecimientos o eventos en el universo no modifican las leyes de la física, las cuales en un instante dado son las mismas que en un instante anterior y seguirán siendo las mismas en los instantes posteriores. Vivimos en un universo donde como un todo está sujeto a principios de conservación fundamentales. Según el teorema de Noether cada afirmación clásica de simetría origina una propiedad de conservación. El Teorema de la Conservación de la Energía es deducido desde la uniformidad del tiempo. El Teorema de Conservación del Momentum se obtiene a partir de la homogeneidad del espacio. El Teorema de Conservación del Momentum Angular o cinético se deduce a partir de la isotropía del espacio.

7. AGUJEROS NEGROS Y FENÓMENOS RELATIVISTAS

Un agujero negro puede ser definido, como una concentración de materia con un campo gravitatorio lo suficientemente intenso para curvar el espacio-tiempo completamente a su alrededor de manera que nada, ni siquiera la luz puede escapar de su atracción. En principio, un agujero negro puede ser de cualquier tamaño, aunque la física teórica indica que

resulta muy difícil concebir la formación de un agujero negro con una masa menor a 1,4 masas solares.

El modelo de agujero negro que estudiaremos, resulta de una consecuencia de la teoría de la gravitación de Einstein o la Teoría de la Relatividad General. El primero en sugerir la existencia de "estrellas oscuras", donde la gravedad fuera tan intensa que ni la luz pudiera escapar de ella fue John Michell de la Royal Society en 1783.

Posteriormente Pierre Laplace llegó a la misma conclusión en 1796, basado en las teorías newtonianas. El concepto fue olvidado por más de un siglo y no fue sino hasta después de la formulación de la Teoría de la Relatividad General de Einstein en 1915, que el científico alemán Karl Schwarzschild analizando las consecuencias de la relatividad, obtuvo un resultado matemático acerca de la geometría del espacio-tiempo, alrededor de una masa esférica de materia. Quedo entonces definido el llamado "Radio de Schwarzschild", donde para cualquier masa existe un radio crítico que corresponde a una distorsión tan extrema del espacio-tiempo, donde si la masa estuviera concentrada dentro de este radio crítico el espacio se cerraría alrededor del objeto, aislándolo del resto del universo y convirtiéndolo en un universo autocontenido. La ecuación del radio de Schwarzschild es la siguiente

$$R = \frac{2GM}{c^2}$$

Donde M es la masa del agujero negro, G es la constante gravitacional y c es la velocidad de la luz. Una estrella que colapsa se convierte en un agujero negro, cuando su radio se hace menor al radio de Schwarzschild para esa estrella. La superficie de ese radio crítico se denomina "Horizonte de Sucesos" y marca la frontera dentro de la cual queda atrapada toda la información.

De acuerdo a lo mencionado, los acontecimientos dentro del agujero negro no pueden ser observados desde afuera. El espacio y el tiempo se distorsionan dentro del horizonte de sucesos y todos los objetos en su interior colapsan a un único punto llamado "singularidad", la cual se ubica en el centro del agujero negro. Se estima que pueden existir agujeros negros supermasivos, de unas 10⁵ masas solares en los centros de las galaxias activas. En el otro extremo de la escala, podrían existir mini agujeros negros con un radio de apenas 10–10 mts y de masa similar a la de un asteroide. Dado que no podemos observar un agujero negro directamente, es posible observar un disco de acreción alrededor del agujero, como resultado de la materia que es atraída hacia el,

proveniente de posibles estrellas compañeras o desde cualquier otra fuente. La dinámica que se produce en el disco de acreción es tal, que se genera energía principalmente en longitudes de onda de Rayos X a medida que la materia cae en espiral hacia el agujero negro. Gracias a los detectores de Rayos X ubicados en satélites artificiales alrededor de la Tierra, se han localizado varios candidatos a agujeros negros en nuestra galaxia la Vía Láctea. Para agujeros negros sin rotación el horizonte de sucesos definido por el radio de Schwarzschild, es una superficie esférica que marca los límites donde la velocidad de escape del agujero iguala a la velocidad de la luz y por lo tanto ningún suceso que ocurre dentro del agujero puede ser observado desde afuera. Más allá y externo al horizonte de eventos, se sienten los efectos del intenso campo gravitacional donde se produce la distorsión espacio-tiempo y otros fenómenos relativistas que han sido explicados por la Teoría de la Relatividad General. Para agujeros negros en rotación, el horizonte de eventos adquiere una forma elíptica debido a la dinámica rotacional del agujero y que achata el objeto hacia los polos y lo alarga hacia el ecuador

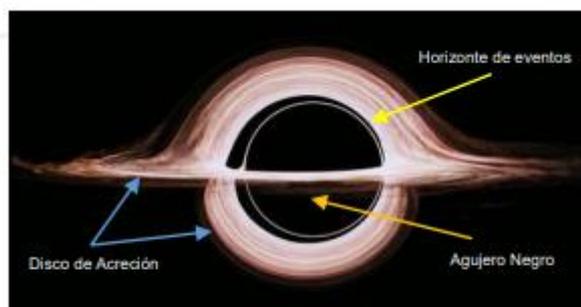


Figura 9. Agujero negro en rotación (Fuente: nmas1.org).

Agujero negro en rotación (Fuente: nmas1.org). El tipo más sencillo de agujero negro es el agujero esférico y sin rotación, el cual no tiene carga eléctrica y se describe matemáticamente por la métrica de Schwarzschild, que a su vez es la solución a las ecuaciones de la Teoría de la Relatividad General de Einstein. Los fenómenos relativistas de dilatación del tiempo y contracción de la longitud son predichos por la Teoría de la Relatividad General y alcanzan su máxima expresión en la vecindad de un agujero negro, donde la materia alcanza velocidades cercanas a la velocidad de la luz. Si se observa un objeto cercano a un agujero negro el cual puede estar ubicado en el disco de acreción del mismo, un observador situado a una distancia grande del agujero Horizonte de eventos Disco de Acreción Agujero Negro pero que aun podría observar bien al objeto en estudio, vería como el objeto se "contrae" entre sus extremos, experimentando una contracción de su longitud. Este extraño fenómeno ocurre para los objetos en movimiento a velocidades relativistas cercanas a la velocidad de la luz (c), pareciendo mas cortos de lo que son realmente, para un observador en reposo o a una velocidad mucho menor que la de la luz. De

igual forma conforme el objeto acelera, los procesos parecen tomar más tiempo cuando ocurren a velocidades relativistas, que cuando el cuerpo está en reposo en relación con un observador.

El tiempo parece que se "dilata" y transcurre más lentamente en estas condiciones. A velocidades relativistas, aparece en las ecuaciones de movimiento el factor K el cual es:

$$K = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Este factor conocido como "Factor de Lorentz", se aplica a las ecuaciones de movimiento de los cuerpos. Para velocidades muy pequeñas respecto a la de la luz, el factor K toma el valor de 1 y cuando la velocidad del cuerpo se iguala a c se produce un resultado infinito (∞), dejando de tener sentido físico. Estudios realizados por el físico teórico Stephen Hawking sugieren que es posible que un agujero negro emita radiación desde las proximidades de su superficie. A esta pérdida de energía se le denomina "Radiación de Hawking". La cantidad de energía emitida por segundo depende solo de la masa del agujero negro. Para el caso de agujeros pequeños, la pérdida puede hacer que el agujero se contraiga hasta desaparecer.

Esta irradiación de energía es mayor para agujeros negros más pequeños y da a cada agujero una temperatura característica. En los llamados "Sistemas Binarios de Rayos X", una gran estrella tiene como compañera a un agujero negro a su alrededor, el cual absorbe material de la estrella por gravedad, tragándose el material de la misma. En su ruta hacia el agujero, la materia arrancada de la estrella forma un disco giratorio y caliente (acreción) emisor de Rayos X. Recientemente en este año 2019 se ha presentado a la comunidad científica y al mundo en general, la primera imagen de un agujero negro obtenida a partir de técnicas digitales. La imagen muestra el objeto supermasivo que se encuentra en el centro de la galaxia elíptica gigante M87 (Figura 10). La enorme turbulencia presente en el disco de acreción de este objeto genera potentes campos magnéticos, que acumulan y desprenden hacia fuera chorros de materia perpendicular al disco y en ambas direcciones (jets), formando a ambos lados lóbulos enormes a gran distancia de los límites

físicos de la propia galaxia.

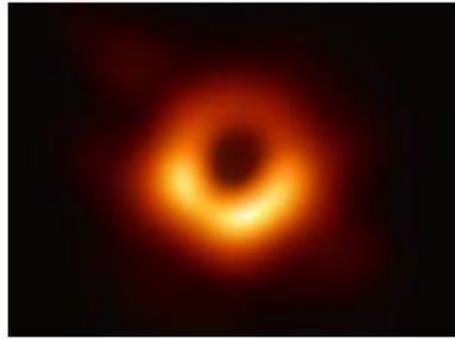


Figura 10. Primera imagen obtenida de un agujero negro (Fuente: europapress.es).

Primera imagen obtenida de un agujero negro (Fuente: europapress.es). Lo que vemos en la imagen no son ni los lóbulos ni los jets, sino la luz captada que orbita alrededor de un objeto supermasivo. Es una especie de esfera de luz inestable cuyos fotones o caerán hacia el objeto o escaparán de él. Esta esfera de fotones se mantiene en rotación. La imagen sugiere que podría tratarse de un agujero negro que presenta rotación, pero esto es algo que aun no ha podido ser comprobado por la comunidad científica.

