Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 40, nº 4, e4310 (2018)
www.scielo.br/rbef
DOI: http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0024

Articles
Licença Creative Commons

Polarización de la luz: conceptos básicos y aplicaciones en astrofísica

Polarization of light: basic concepts and applications in astrophysics

Jenny Marcela Rodríguez*[1]

[1]Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Av. dos Astronautas, 1758, São José dos Campos, SP, Brasil

Recibida en 24 de Enero, 2018. Revisado en 8 de May, 2018. Aceptado en 29 de May, 2018.

La astrofísica permite entender aplicaciones concretas de la leyes físicas y constituye una herramienta didáctica para la enseñanza de la física. Específicamente conceptos de la física electromagnética como la polarización de la luz que permite estudiar diferentes objetos astrofísicos como: estrellas, planetas y galaxias. Este trabajo presenta una revisión histórica del fenómeno de polarización, conceptos físicos básicos, descritos desde las ecuaciones de Maxwell; serán presentados conceptos como los estados de polarización, los parámetros de Stokes y los procesos de polarización. Además algunas aplicaciones en la física solar, sistemas planetarios, materia interestelar, *Masers* astronómicos, púlsares y núcleos activos de galaxias (AGNs).
Palabras clave: Polarización, Campo magnético, Planetas, Galaxias

The astrophysics allows to understand applications about physical laws and it constitutes a powerful, didactic tool for the teaching. Concepts of the electromagnetism, such as the polarization of the light let us study different astronomical objects, such as stars, planets and galaxies. This work shows an historical revision about the polarization, physical concepts described by Maxwell's equation. Also, some concepts as polarization states, Stokes parameters and polarization processes will be presented. As well applications in solar physics, planetary systems, interstellar matter, Astronomical Massers, pulsars and Active Galactic Nuclei will be described in this article.
Keywords: Polarization, Magnetic field, Planets and Galaxies.

1. Introducción

La polarización es una propiedad de la luz, que describe la geometría interna de una fuente de radiación [1]. La polarización junto con la fotometría, la espectroscopia y el análisis de imágenes de diferentes fuentes de radiación ha hecho posible descubrimientos en el área de la astrofísica.

Históricamente este fenómeno se atribuyó al descubrimiento hecho por un marinero que regresó a Copenhague desde Islandia, trayendo consigo hermosos cristales que ahora conocemos como calcita. Estos cristales fueron estudiados por Erasmus Bartholin [2], un médico danés, matemático, y físico (1669). Él observó que las imágenes formadas a través de estos cristales eran dobles. Además, al girar el cristal, una imagen permaneció en su lugar mientras que la segunda giró con el cristal [3].

Ese fenómeno es conocido como la birrefringencia, o doble refracción, generalmente se presenta en la calcita y en algunos plásticos sometidos a tensión como el celofán. Estos materiales son isótropos (sus propiedades no dependen de la dirección en la cual son medidas). La luz incidente se separa en dos rayos llamados ordinario y extraordinario. Estos rayos están polarizados en direcciones perpendiculares, en general el rayo ordinario sigue la ley de Snell y el otro no [4].

Varios científicos estudiaron este fenómeno por ejemplo Christiaan Huygens e Sir Isaac Newton [5]. Huygens explicó la doble refracción con la idea de frentes de onda propagándose. En general, cuando un rayo de luz atraviesa un cristal, como la calcita, este se descompone en dos rayos cuyas ondas vibran en planos perpendiculares [6]. Huygens formuló la hipótesis de que la luz es una onda longitudinal es decir que ondula en la dirección de su desplazamiento a semejanza de las ondas sonoras. Por otro lado, Newton describió que la luz tienen las mismas propiedades en todas las direcciones perpendiculares a la dirección de propagación, mientras que los rayos doblemente refractados mostraban diferentes propiedades en diferentes direcciones en un plano perpendicular a la dirección de propagación.

En general, la mayor parte del debate científico sobre la óptica durante el siglo XVIII estaba entre las teorías corpusculares y ondulatorias, pero la doble refracción seguía siendo un problema importante sobre el cual no se tenía un consenso. De hecho, Huygens en su libro *Traité de la Lumiére* publicado en 1690 describió el fenómeno observado en los cristales de calcita como maravilloso. En ese momento no existía una explicación concluyente acerca de este fenómeno. Sin embargo, George Gabriel

*Correo electrónico: jemfisi@gmail.com.

Copyright by Sociedade Brasileira de Física. Printed in Brazil.

Stokes, Profesor de Matemáticas en la Universidad de Cambridge, estableció un formalismo matemático para describir el estado de polarización de cualquier haz de luz [7]. Este formalismo describiría el fenómeno presente en los cristales de calcita y que tanto intrigó a Huygens.

Observaciones astronómicas de luz polarizada comenzaron en la mitad del siglo XIX. Una de las primera publicaciones estudiaba la polarización linear de la luz solar reflejada por la luna [8]. También, la polarización linear de la corona solar fué estudiada por Edlun, E. en 1860 [9]. Esta área evolucionó notablemente desde el campo de la polarización óptica hasta la polarización en radio. Así fueron desarrolladas algunas aplicaciones espaciales en rayos X en la década de los años 70 [10].

La polarización es una propiedad fundamental de la radiación electromagnética. Ella provee información acerca del campo magnético y permite describir las características internas de objetos astronómicos. La polarización ha sido usada para mapear el campo magnético solar y estelar [11], caracterizar la composición superficial de cuerpos del sistema solar [12], contribuir al descubrimiento de la radiación sincrotrón en objetos astronómicos [13] y ayudar al descubrimiento y caracterización de campos magnéticos galácticos de larga escala [14].

Este trabajo describe conceptos físicos básicos sobre la polarización y algunas aplicaciones en observaciones astronómicas. En la sección 2 se presentan conceptos básicos sobre ondas electromagnéticas, polarización y parámetros de Stokes. Procesos de polarización como la polarización por scattering, dicroismo, efecto Zeeman y efecto Hanle son descritos en la sección 3. Algunas aplicaciones en física solar y estelar, sistemas planetarios, materia interestelar, *masers* astronómicos, pulsares y núcleos activos de galaxias se describen en la sección 4. Finalmente en la sección 5 se presenta la discusión.

2. Conceptos físicos básicos

Algunos conceptos descritos en la física electromagnética como el campo magnético, el campo eléctrico, las ecuaciones de Maxwell y las ondas electromagnéticas son importantes para explicar el fenómeno de la polarización y serán descritos a continuación.

2.1. Ondas electromagnéticas

Las ondas electromagnéticas no necesitan de un medio para propagarse, así que pueden propagarse en el vacío. La Figura 1 representa de manera esquemática una onda electromagnética, en general el campo magnético **B** y eléctrico **E** son perpendicularmente entre sí. En el vacío y en ausencia de cargas eléctricas, las ondas electromagnéticas pueden ser derivadas de las ecuaciones de Maxwell

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \varrho/\varepsilon_o \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \tag{2}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B}/\partial t \tag{3}$$

Figura 1: Onda electromagnética, los puntos azules describen el campo magnético **B**, las líneas punteadas rojas corresponden al campo eléctrico **E**, x corresponde a la dirección de propagación, en este caso $\phi_1 = \phi_2 = 0$, $\omega = (0,\, 6\pi)$ y $E_x\,(0) = E_y\,(0) = 1$. Fuente: autora.

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_o J + \mu_o \varepsilon_o \partial \mathbf{E}/\partial t \tag{4}$$

donde **E** corresponde al campo eléctrico, **B** es el campo magnético, **J** es la densidad de corriente, ϱ es la densidad de carga, ε_o es la permitividad eléctrica y μ_o es la permitividad magnética.

La ecuación 1 se refiere a la ley de Gauss, que se reduce a la ley de Coulomb para cargas puntuales. La ecuación 2 describe la inexistencia de monopolos magnéticos en la naturaleza. La ecuación 3 es la expresión diferencial de la ley de Faraday que establece que todo campo magnético que varía con el tiempo inducirá un campo eléctrico. La ecuación 4 se conoce como la ley de Ampère modificada, esta describe como un campo eléctrico variable en el tiempo produce un rotacional del campo magnético.

Suponiendo un campo **E** = (0,E,0) y **B** = (0,0,B) en coordenadas cartesianas, $\varrho = 0$ y **J** = 0, reemplazando en las ecuaciones de Maxwell tenemos:

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial y} = 0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial z} = 0 \tag{6}$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \tag{7}$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial x} = \mu_o \varepsilon_\mathbf{o} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \tag{8}$$

Aplicando $\partial/\partial x$ a la ecuación 7 y $\partial/\partial t$ a la ecuación 8 se obtiene una expresión para el campo eléctrico:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial x^2} = \mu_o \varepsilon_o \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \tag{9}$$

La ecuación 9 describe la ecuación diferencial para una onda electromagnética, para el caso particular de una onda armónica tenemos la siguiente solución

$$E(tz) = E(0,0) cos(\omega t - kz - \phi) \tag{10}$$

 DOI: http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0024

donde t es el tiempo, ω es la frecuencia angular, k es el valor absoluto del vector de onda y ϕ denota una fase arbitraria. Como el vector campo magnético es perpendicular a z, se puede descomponer $\mathbf{E}$(t,z) en componentes x, y. Además podemos simplificar usando z = 0, entonces las componentes son

$$E_x(t) = E_x(t)cos(\omega t - \phi_1) \tag{11}$$

$$E_y(t) = E_y(t)cos(\omega t - \phi_2) \tag{12}$$

donde ϕ_1 y ϕ_2 describen dos ángulos de fase arbitrarios. Para definir los estados de polarización podemos definir $\phi_1 = \phi_2 = \phi$. La Figura 2 ilustra los diferentes tipos de polarización. Estos se describirán en detalle en la siguiente sección.

2.2. Polarización

Polarización generalmente significa "orientación", viene de la palabra griega *Polos*. Este término es utilizado para describir cómo la luz u otra radiación electromagnética están restringidas a una dirección de propagación. Si una onda electromagnética no tiene orientación preferencial se dice que no está polarizada; pero si existe una dirección preferencial se dice que está polarizada [15]. Por ejemplo la luz emitida por una lámpara de tungsteno no está polarizada mientras la luz solar dispersa que ocasiona el cielo azul está polarizada, esto ocurre gracias a la dispersión Rayleigh [16].

Existen diferentes tipos de polarización: la polarización elíptica, lineal y circular. Estos estados de polarización pueden ser descritos usando la fase ϕ de la onda electromagnética. La polarización elíptica es el caso más general y ocurre cuando $\phi \neq 0$, así el vector campo eléctrico describe una elipse en el plano perpendicular a la dirección de propagación (Figura 2).

Se dice que una onda está linealmente polarizada si las componentes $\boldsymbol{x}$ e $\boldsymbol{y}$ del campo eléctrico están en fase $\phi_1 = \phi_2 = 0$ o en oposición de fase $\phi = \pi$; así el campo eléctrico describe una recta en el plano. Para el caso específico $\phi_1 = \phi_2 = 0$ las componentes de $\mathbf{E}$ son:

$$E_x(t) = E_x(0)cos(\omega t) \tag{13}$$

Figura 2: Diferentes tipos de polarización: linear, elíptica y circular. La fase ϕ describe cada unos de los estados de polarización. Las flechas denotan el sentido de rotación, en este gráfico se presenta el caso específico de estados de polarización con sentido de rotación hacia la derecha. Fuente: Autora.

$$E_y(t) = E_y(0)cos(\omega t) \tag{14}$$

Así la orientación de $\mathbf{E}$ depende solo de la magnitud de $E_x()$ y $E_y()$ y depende del tiempo. La radiación es linealmente polarizada en el intervalo $\phi = [0, \pi]$ [10;17]

En el caso que la fase cambie $\phi_1 = \phi_2 \pm \pi/2$

$$E_x(t) = E_x(0)cos(\omega t) \tag{15}$$

$$E_y(t) = \pm E_y(0)sin(\omega t) \tag{16}$$

El vector campo eléctrico se mueve circularmente con una frecuencia angular ω, la radiación es circularmente polarizada. El signo de $\mathrm{E_y(t)}$ determina el movimiento de E, un signo positivo corresponde a un movimiento en sentido contrario a las manecillas del reloj o comúnmente conocido como polarización circular de mano derecha (RHC). Con un signo negativo, el movimiento es llamado polarización circular de mano izquierda (LHC) [17]

2.3. Parámetros de Stokes

El estado de polarización de una onda electromagnética puede caracterizarse usando tres parámetros independientes: E_x, E_y y la diferencia de fase $\delta = \phi_2 - \phi_1$. En general las observaciones de objetos astronómicos son hechas en términos de la intensidad de la luz y de la amplitud del campo, entonces para cuantificar el grado de polarización es conveniente usar esas intensidades, esto es calculando los siguientes parámetros de Stokes que generalmente se denotan con el vector $S = (I, Q, U, V)$

$$\begin{aligned} I &= \langle E_x^2 \rangle + \langle E_y^2 \rangle \\ Q &= \langle E_x^2 \rangle - \langle E_y^2 \rangle \\ U &= 2\langle E_x\, E_y\, cos\delta \rangle \\ V &= 2\langle E_x\, E_y\, sin\delta \rangle \end{aligned} \tag{17}$$

Donde $\langle ... \rangle$ denota un promedio en el tiempo [10].

$\boldsymbol{I}$ es considerada la intensidad de la onda. El parámetro $\boldsymbol{Q}$ cuantifica la diferencia en las intensidades $\boldsymbol{x}$ e $\boldsymbol{y}$, además provee información sobre la polarización linear. El parámetro $\boldsymbol{U}$ cuantifica la diferencia entre dos componentes de campo diagonales en ángulos de 45° y 135°, contado desde el eje positivo de $\boldsymbol{x}$. El parámetro $\boldsymbol{V}$ corresponde a la polarización circular [18, 19].

Para ondas individuales con polarización microscópica, los parámetros de Stokes se pueden relacionar como:

$$I^2 = Q^2 + U^2 + V^2 \tag{18}$$

Esto reduce el número de parámetros libres, asi $\boldsymbol{I}$ es constante, para cada estado de polarización de una onda y corresponde a un punto en la esfera de Poincaré [3]. Esta esfera es la representación geométrica de los vectores de Stokes, cuyas componentes se expresan en coordenadas cartesianas como un punto en la esfera (Figura 3).

Figura 3: La esfera de Poincaré tiene radio unitario. Cada punto en la superficie de la esfera representa uno de los posibles estados de polarización de un haz de luz monocromático. Fuente: Autora.

Figura 4: Polarización por scattering o dispersión. Un haz de luz inicialmente no polarizado se mueve a lo largo del eje z, incide sobre un centro de dispersión situado en el origen, después de la interacción la luz es polarizada linealmente en las direcciones x e y. Fuente: Autora.

3. Procesos de polarización

Existen diversos procesos de polarización, entre ellos se encuentran la polarización por dispersión o *scattering,* dicroismo, radiación de sincrotrón, efecto Zeeman y el efecto Hanle. A continuación se describirán las principales características de tipos de polarización.

3.1. Polarización por scattering

La dispersión o *scattering* es un proceso físico en el que algunas formas de radiación, como la luz, el sonido o las partículas en movimiento, se ven obligadas a desviarse de una trayectoria recta por uno o más trayectos debido a no uniformidades localizadas en el medio por el que pasan [4].

Así la polarización por *scattering*, se puede describir cuando una haz de luz no polarizada se propaga en la dirección z incide sobre un centro de dispersión situado en el origen. Luego de la interacción con una carga, atomo o molecula, la luz dispersada en el plano $z = 0$ a lo largo de la dirección x está polarizada en la dirección y, mientras en la dispersada en la dirección y está polarizada en la dirección x (Figura 4). Este fenómeno puede ser visualizado como si las cargas, atomos o moleculas se comportan como pequeñas antenas que irradian perpendicularmente a la luz incidente [16, 4].

Una aplicación de este fenómeno es el *scattering* ocasionado por polvo de materia interestelar [20]. Los granos de polvo tiene tamaños del orden de micrómetros correspondientes a longitudes de onda desde visible hasta infrarrojo. Así la dispersión de la luz debida a granos de polvo interestelar genera luz polarizada linealmente [10, 19].

3.2. Dicroísmo

El Dicroísmo o absorción selectiva se refiere a la propiedad de ciertos materiales de absorber luz en mayor o menor grado dependiendo del estado de polarización [10, 16]. Los polaroids son conocidos como polarizadores lineales dicroicos. Estos son compuestos por capas de polimeros organicos. Edwin Land a quien se atribuye el descubrimiento del polaroid, estableció Polaroid Corporation en 1937 en Cambridge, Massachusetts. La compañía produjo inicialmente Polaroid Day Glasses, la primera gafas de sol con un filtro polarizador [21]. La Figura 5 ilustra cómo funciona el filtro polarizador de las gafas polaroid. La luz parcialmente polarizada pasa a través de la lente polaroid transmitiendo sólo la componente de luz polarizada a lo largo de una dirección particular (vertical en este caso) y absorbiendo la componente perpendicular a esa dirección, en consecuencia la intensidad observada es reducida.

La intensidad transmitida por un polarizador es función de la intensidad incidente y del ángulo, esta relación es conocida como la ley de Malus:

$$I(\theta) = I_o cos^2\theta \tag{19}$$

Donde I_o es la intensidad inicial, θ es el ángulo entre el plano de polarización inicial de la luz y el eje del polarizador. En el caso que $\theta = 0$, se obtiene $I(\theta) = I_o$, indicando que la intensidad transmitida por las gafas es máxima; cuando $\theta = \pi/2$ entonces $\mathrm{I}(\theta) = 0$, es decir la intensidad transmitida es mínima [22]. Entonces para reducir al máximo la intensidad de la luz que atraviesa las gafas Polaroid, éstas han de tener su eje de polarización dispuesto verticalmente.

3.3. Efecto Zeeman

El Efecto Zeeman está relacionado con líneas de emisión o absorción en la presencia de un campo magnético. Cuando se aplica a un átomo un campo magnético externo,

Figura 5: Dicroismo presente en las gafas con polaroid. En general, la luz parcialmente polarizada pasa a través de la lente polaroid transmitiendo sólo la componente de luz polarizada a lo largo de una dirección particular, ocasionando que la intensidad sea reducida. Fuente: Autora.

se observa un desdoblamiento de las líneas espectrales y también una polarización de la luz emitida (Figura 6). Este efecto fue observado por primera vez por Zeeman en 1896 [23]. La polarización de la luz emitida puede definirse usando los parámetros de Stokes (I, Q, U, V), en general se asume el ángulo entre la línea de visada y el campo magnético o la intensidad total en función de la frecuencia.

Los átomos que emiten luz en la presencia de un campo magnético (como en las manchas solares) depende del efecto Zeeman y la radiación emitida está polarizada. También, electrones de muy alta energía (relativistas) giraran en presencia de un campo magnético alrededor de una estrella de neutrones y emitirán luz polarizada llamada radiación de sincrotrón. Los espectros e imágenes de polarización contienen información adicional acerca de los procesos físicos y la geometría de la fuente que no se puede discernir usando solamente mediciones de brillo [16].

Figura 6: Efecto Zeeman. Panel izquierdo: espectro y transiciones electrónicas en ausencia de campo magnético. Panel derecho: espectro en presencia de un campo magnético externo. Fuente: Autora.

3.4. Efecto Hanle

El efecto Hanle se refiere a la dispersión de la luz por pequeñas partículas materiales que también polarizan la luz. El efecto Hanle es la modificación de esta polarización y de sus consecuentes efectos observables mediante la acción de un campo magnético débil tal que su correspondiente desdoblamiento Zeeman es comparable a la anchura natural del nivel atómico degenerado que se está considerando [24].

Un ejemplo del efecto Hanle puede ser visto en el sol, si nos imaginamos un fotón que emerge vertical de la superficie del Sol y es desviado a 90° por una partícula de las capas altas de la atmósfera hacia el observador, la luz, que inicialmente era natural, deviene linealmente polarizada. Pero si ese proceso de dispersión se produce en presencia de un pequeño campo magnético orientado en la dirección hacia o desde el observador, el resultado es que el grado de polarización de la luz desviada disminuye `http://www.sea-astronomia.es/drupal/sites/default/files/archivos/descubre/como_medimos_campo_magnetico.pdf`. Este efecto es usado frecuentemente junto con el efecto Zeeman para calcular el campo magnético del Sol. En la siguiente sección se describirán algunas aplicaciones de la polarización.

4. Aplicaciones

La polarización es una excelente herramienta para estudiar fenómenos propios de la astronomía como sistemas planetarios, atmósferas de planetas o de estrellas como el Sol, Masers, púlsares, materia interestelar, núcleos activos de galaxias y campo magnético galáctico. A seguir serán descritas las principales características de las aplicaciones enunciadas anteriormente.

4.1. Física solar y estelar

La polarización juega un papel importante para el estudio de estrellas de tipo espectral F a M. El tipo espectral de una estrella se refiere a un tipo de clasificación de acuerdo con las características de su espectro y se enumeran de las más cálidas a las más frías [25]. Las estrellas de tipo espectral F a M poseen una región convectiva.

El Sol posee un tipo espectral G y se conoce que es una estrella estratificada con diferentes capas entre ellas una región convectiva [26]. En este tipo de estrellas el campo magnético es generado por procesos de dinamo [26, 27].

Los campos magnéticos pueden ser analizados via espectropolarimetría de líneas de absorción, las cuales son afectadas por el efecto Zeeman. La orientación de las líneas se puede obtener desde la intensidad de la polarización circular y lineal. Adicionalmente, medidas del efecto Zeeman y el efecto Hanle puede ser usado para obtener el campo magnético en el Sol.

En la Figura 7 se puede observar una región activa del sol llamada NOAA 12443 observada el 7 de Noviembre de 2015 a las 20:58:11 UT, por el instrumento HMI del satélite de observación solar SDO [28]. Este instrumento mide el campo magnético solar en la fotosfera que es considerada la superficie del Sol, usualmente estas medidas son llamadas magnetogramas.

En la Figura 8 se presenta un ejemplo de los parámetros de Stokes medidos en la Región Activa solar NOAA 12443 (Figura 7). Px se refiere a la resolución espacial en pixels y la longitud de onda (λ) usada es 6300.8Å, las flechas verdes indican las líneas de hierro neutro (FeI) 6301.5107 Å y 6302.5000Å donde la mayor parte de la radiación es absorbida como se puede ver claramente en un perfil de Stokes I.

Figura 7: Región Activa solar NOAA 12443. Magnetograma observado con el instrumento HMI del satélite solar SOHO. Fuente: Solar Monitor (`https://www.solarmonitor.org/index.php?date=20151107&region=12443`)

Figura 8: Medición de los parámetros de Stokes en la región solar AR NOAA 12443, medida usando el telescopio Hinode el 3 de Noviembre de 2015 a las 14:15:49 UT. Px denota la resolución espacial en pixels y λ es la longitud de onda. Fuente: [29]

4.2. Sistemas planetarios

La polarización es considerada una herramienta para el estudio de superficies sólidas como las de planetas rocosos y asteroides [10, 30, 31]. En general, Mercurio, Venus, la Tierra y Marte se llaman planetas rocosos o terrestres (Figura 9). Los planetas rocosos poseen un núcleo metálico, que consiste principalmente de hierro y un manto de silicato, tienen características topológicas

Figura 9: Atmósferas planetarias. a) Atmósfera de Mercurio en alta resolución observada por la misión MESSENGER de NASA. b) Silueta del Transbordador espacial Endeavour visto a contraluz en la atmósfera terrestre. La capa naranja es la troposfera, la capa blanca es la estratosfera y la capa azul es la mesosfera. c) La delgada y tenue atmósfera de Marte. d) Imagen en color y contraste de la atmósfera de Neptuno. Adaptado de: Universe Today- Space and Astronomy News (`https://www.universetoday.com/35796/atmosphere-of-the-planets/`).

como montañas, valles, cráteres, etc. en su superficie; además tienen pocos o ningún satélite [32].

La luz del sol es reflejada por la superficie sólida, de esta forma es posible caracterizar dichas superficies mediante polarización linear debida a polarización por *scattering*. El máximo grado de polarización lineal es función de la longitud de onda y de la estructura del planeta o asteroide [12].

La reflexión de la luz en las atmósferas planetarias es afectada principalmente por la dispersión Rayleigh, también por la refracción y reflexión de gotas de líquido en nubes. Los grados de polarización dependen fuertemente de la geometría y de la composición química de la atmósfera. Para conocer cuantitativamente las propiedades de la polarización son necesarios modelos numéricos [33]. Adicionalmente este tipo de análisis pueden ser aplicados al estudio de exoplanetas usando imágenes polarimétricas [34].

4.3. Materia interestelar

El medio interestelar se refiere al contenido de materia y energía entre las estrellas dentro de una galaxia. En general, está compuesto por materia en diferentes estados, desde nubes densas y frías con temperaturas de pocos Kelvins y partículas con densidades 10^3 - 10^5 cm^{-3}. También existe un medio ionizado caliente con temperaturas ~10^6 K y densidades de ~3 x 10^{-3} cm^{-3}. Además polvo interestelar está presente a través de las galaxias [10, 35, 36].

La interacción entre polvo interestelar y campo magnético de las galaxias es responsable de la polarización interestelar por *scattering* [37]. En el caso del material circunestelar (constituido por gas, polvo y objetos rocosos o de hielo) en las vecindades de una estrella presenta polarización *scattering* debida a alineamiento de granos de polvo en el campo magnético del disco circunestelar [38] como se puede ver en la Figura 10. Las imágenes polarimétricas son usadas para estudiar las estructuras magnéticas en los discos alrededor de estrellas jóvenes [39]. También las imágenes polarimétricas de material circunestelar ha sido usada para analizar proto estrellas presentes en materia interestelar [40]. La polarización circular ha sido usada para observar regiones de formación estelar (Figura 11) [38]

4.4. Masers Astronómicos

Uno de los descubrimientos más espectaculares de la astronomía molecular ha sido la detección de la emisión *maser*. Está radiación se produce naturalmente en el espacio interestelar. Es una radiación intensa, que es usualmente usada para sondear las estructuras más pequeñas que se pueden estudiar con radiotelescopios. Por una afortunada coincidencia, se genera radiación *maser* tanto en las regiones de formación de estrellas como en las envolturas de las estrellas de tipo tardío o estrellas super o gigantes [41].

Figura 10: Disco circunestelar alrededor de la estrella SAO 206462 (`https://phys.org/news/2011-10-spiral-arms-hint-presence-planets.html{#}jCp`), una estrella joven en la constelación de Lupus. Imagen adquirida por el telescopio Subaru usando su instrumento HiCIAO. Adaptada de: `https://phys.org/news/2011-10-spiral-arms-hint-presence-planets.html`

Figura 11: Región de formación estelar W3 (`http://herschel.cf.ac.uk/results/w3-star-forming-region`), a 6.200 años luz de distancia en el brazo de Perseus, uno de los brazos espirales de la vía Láctea, que alberga la formación de estrellas de baja y gran masa. Imagen del observatorio espacial Herschel, las estrellas de baja masa se ven como diminutos puntos amarillos incrustados en filamentos rojos fríos, mientras que las estrellas de mayor masa (con más de ocho veces la masa de nuestro sol) emiten radiación intensa , calentando el gas y el polvo a su alrededor y apareciendo en azul. Créditos de las imágenes: ESA/PACS & SPIRE consortia, A. Rivera-Ingraham & P.G. Martin, Univ. Toronto, HOBYS Key Programme (F. Motte). Adaptada de: `https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=3748`,

Los masers astronómicos tienden a mostrar un ensanchamiento Zeeman causado por el campo magnético permeando el medio maser. Así las polarizaciones están presentes gracias al grado de ensanchamiento Zeeman y pueden ser caracterizadas usando los parámetros de Stokes. Para mayores detalles ver [42, 43].

4.5. Pulsares

Los púlsares son estrellas de neutrones con fuertes magnetosferas (Figura 12). Su radiación es compuesta por radiación térmica proveniente de la superficie de la estrella y radiación sincrotrón no térmica creada por la magnetosfera estelar [44].

Figura 12: Pulsar giratorio (animación), con su fuerte campo magnético girando junto con él. Nubes de partículas cargadas se mueven a lo largo de las líneas de campo y sus rayos gamma son emitidos por los campos magnéticos (Crédito: NASA / Goddard / CI Lab `https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/objects/neutron_stars1.html`).

La polarización está presente en los púlsares, especialmente la polarización circular causada por las regiones de formación estelar, aunque también se cree que puede ser causada por homoquiralidad, que causa que la luz reflejada desde cierta superficie biológica llegue a ser circularmente polarizada. Este efecto puede ser extrapolado para detectar vida en otros planetas vía espectropolarimetría de una luz proveniente de una estrella reflejada desde la superficie [45].

4.6. Núcleos Activos de Galaxias (AGNs)

En el universo se encuentra galaxias de diferentes tipos, uno de ellos es el grupo de las galaxias activas. Las galaxias activas contienen un núcleo que emite energía en cantidades enormes y de manera muy violenta. Un ejemplo es la Galaxia Activa Seyfert NGC 1068, esta galaxia posee un pequeño núcleo con intensa actividad (Figura 13). Esos núcleos reciben el nombre de núcleos activos de galaxias (AGNs) o núcleos de galaxias activas.

Las teorías más aceptadas para describir este fenómeno, se atribuyen la emisión de energía a un agujero negro supermasivo situado en el centro de estas galaxias, sobre el cual se precipita materia a un ritmo considerable. La caída del material induce su calentamiento y compresión, desencadenando la emisión de energía en todas las longitudes de onda del espectro[1] [46].

Los AGNs son fuentes sincrotrón, su emisión es linealmente polarizada [10]. Han sido detectadas salidas de material desde AGN, especialmente la formación de *jets*, los cuales se extienden varios Megaparsecs en casos extremos. Los *jets* emiten también radiación sincrotrón. La polarización lineal es usada para rastrear la orientación e intensidad del campo magnético a lo largo de los *jets*.

La espectropolarimetría en longitudes de onda ópticas muestra que el flujo total recibido desde la galaxia es compuesto por una componente sin polarización observada directamente desde gas con estrechas líneas de emisión

[1] `http://www.sea-astronomia.es/drupal/node/279`

Figura 13: Galaxia Activa Seyfert NGC 1068, una de las galaxias más estudiadas, caracterizada por una intensa actividad proveniente de su pequeño núcleo. Fuente: `https://www.universetoday.com/39131/messier-77/`

localizada en el *torus* de polvo y solamente es visible indirectamente vía dispersión Thompson [47, 48].

Los discos de galaxias y *clusters* de galaxias son permeados por campo magnético de larga escala con intensidades de μGauss. El análisis de este campo magnético es basado en la polarización, específicamente usando el concepto de rotación Faraday o efecto Faraday, en general es caracterizado por la rotación del plano de polarización de la luz debido a la interacción de la misma con un campo magnético, dentro de un medio material. Además el ensanchamiento de líneas de emisión debido al efecto Zeeman y radiación sincrotrón son importantes conceptos para el estudio de campo magnético en discos de galaxias y *clusters*

5. Discusión

La polarización de la luz permite obtener información necesaria para entender algunos sistemas astrofísicos, como la estructura de estrellas, planetas y galaxias; específicamente, la polarimetría permite describir y medir el campo magnético de objetos astrofísicos (intensidad y orientación) que no pueden ser medidos directamente. La polarimetría ha brindado una vasta cantidad de aplicaciones en diferentes campos de la astrofísica, desde la física solar hasta la cosmología. Esta revisión provee algunas aplicaciones que ponen en evidencia la importancia de la polarimetría, así como de la información que no podríamos obtener de otra manera. Además, muestra como la astrofísica permite entender aplicaciones concretas de la leyes físicas, específicamente de la física electromagnética.

Este artículo espera ser una herramienta didáctica para la enseñanza de la física.

Agradecimientos

Este trabalho es parcialmente apoyado por CNPq/Brasil no. 300596/2017-0/2017. Me gustaría agradecer a los revisores anónimos ya que sus comentarios ayudaron a mejorar este artículo.

Referencias

[1] R.A. Serway y J.W. Jewett *Física para ciencias e ingeniería con física moderna* (Cengage Learning Editores, México, 2009), v. 2.
[2] E. Bartholin Philosophical Transactions **5**, 2039 (1670).
[3] J.C. Del Toro Iniesta, *Introduction to spectropolarimetry* (Cambridge University Press, Cambridge 2004).
[4] P. Tipler *Física Pre Universitaria* (Editorial Reverte, Barcelona, 2006).
[5] L. Tarásov y A. Tarásova *Charlas sobre la refracción de la luz, Física al alcance de todos* (Mir Editorial, Moscou, 1985).
[6] L. Blanco, Arbor **191**, a263 (2015).
[7] G.G. Stokes Transactions of the Cambridge Philosophical Society **9**, 399 (1851).
[8] A. Secchi Astronomische Nachrichten **54**, 35 (1860).
[9] E. Edlun Astronomische Nachrichten **52**, 305 (1860).
[10] S. Trippe Journal of the Korean Astronomical Society **1**, 25 (2014).
[11] C. Schrijver y C. Zwaan *Solar and Stellar magnetic activity* (Cambridge University Press, New York, 2000).
[12] E. Bowel y B. Zellner in *Proceedings of the International Astronomical Union,* edited by T. Gehrels (University of Arizona Press Tucson, 1974).
[13] J.H. Oort y T Walraven Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands **12**, 285 (1956).
[14] R. Kulsrud y E. Zweibel, Reports on progress in physics **71**, 046901 (2008).
[15] D. Clarke y J. Grainger *Polarized Light and Optical Measurement* (Pergamon Press, New York, 1971).
[16] I.S. McLean *Electronic imaging in astronomy. Detector and instrumentation* (Praxis Publishing Ltd, Chichester 2008) 2ªed.
[17] A.T Cantero *Óptica electromagnética* (Alqua, Stanford, 2004).
[18] D. Goldstein *Polarized light* (Marcel Dekker, New York, 2003) 2nd.
[19] M. Born y E. Wolf *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light* (Cambridge University Press, New York, 1999).
[20] J.E. Dyson y D.A. Williams *The physics of the interstellar medium* (Institute of Physics Publishing, Bristol, 1997) 2ªed.
[21] S.D Fantone y H. Edwin, Optical Engineering **33**, 996 (1994).
[22] S. Burbano, E. Burbano y M.C. García *Física General* (Editorial Tébar Flores, Madrid, 2003).
[23] L.E. Degl'innocenti y M. Landolfi, *Polarization in Spectral Lines* (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2005).
[24] R.M. Saínz *Polarización por procesos de dispersión y el efecto Hanle en atmósferas estelares débilmente magnetizadas.* Tese de Doutorado, Universidad de la Laguna, San Cristóbal de La Laguna (2002).
[25] H. Karttunen, P. Kroger, H. Oja, M. Poutanen y KJ. Donner *Fundamental Astronomy* (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 2007) 15ªed.
[26] J.M. Rodríguez Gómez, F. Carlesso, L.E. Vieira y L Da Silva Rev. Bras. Ensino Fís. **40,** 3 (2018).
[27] S.V. Berdyugina in *Proceedings of the International Astronomical Union,* edited by K.G Strassneier, A.G Kosovichev e J. Beckman (Cambridge University Press, Cambridge, 2009) p. 323
[28] P.H. Scherrer, J. Schou, R.I. Bush, A.G. Kosovichev, R,S. Bogart, J.T. Hoeksema, Y. Liu, T.L. Duvall, J. Zhao, A.M. Title et al. Solar physics **275**, 207 (2012).
[29] A. Chicrala, *Evolution of active regions based on solar-surface magnetic flux observations and coronal magnetic fields extrapolations: a case-study of noaa 12443.* Dissertação de Mestrado Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos (2017).
[30] M. Ishiguro, H. Nakayama, M. Kogachi, T. Mukai, R. Nakamura, R. Hirata y A. Okazaki Publications of the Astronomical Society of Japan **49** L31 (1997).
[31] A. Cellino, R.G. Hutton, M. Di Martino, P.H. Bendjoya, I.N. Belskaya y E.F. Tedesco, Icarus **179**, 304 (2005).
[32] R. Miller *Seven wonders of the rocky planets and their moons* (Twenty first century books, Minneapolis, 2011).
[33] E. Buenzli y H.E. Schimid Astronomy and Astrophysics **504**, 259 (2009).
[34] J. Milli, D. Mouillet, D. Mawet, H.M. Schmid, A. Bazzon, J.H. Girard, K. Dohlen y R. Roelfsema Astronomy & Astrophysics **556**, A64 (2013).
[35] A.G.G.M. Tielens *Physics and chemistry of the interstellar medium* (Cambridge University Press, Cambridge, 2010).
[36] S. Kwok *Physics and chemistry of the interstellar medium* (University Science Books, California, 2007).
[37] M.I. Matsumura, Y. Kameura, K.S. Kawabata, H. Akitaya, M. Isogai y M. Seki Publications of the Astronomical Society of Japan **63**, L43 (2011).
[38] J. Kwon, M. Tamura, P.W. Lucas, J. Hashimoto, N Kusakabe, R. Kandori, Y.I. Nakajima, T. Nagayama, T. Nagata y J.H. Hough The Astrophysical Journal Letters **765**, L6 (2013).
[39] K.I. Sugitani, F. Nakamura, M. Tamura, M. Watanabe, R. Kandori, S. Nishiyama, N. Kusakabe, J. Hashimoto, T. Nagata y S. Sato The Astrophysical Journal **716**, 299 (2010).
[40] H. Saito, M. Tamura, R. Kandori, N. Kusakabe, J. Hashimoto, Y. Nakajima, Y. Sato, T. Nagata, T. Nagayama y D. Kato The Astronomical Journal **137** 3149 (2009).
[41] M. Elitzur Astrophysics and Space Science Library **170**, 365 (1992).
[42] M. Elitzur in: *Astrophysical spectropolarimetry*, edited by J Trujillo-Bueno (Cambridge University Press, Cambridge, 2000).
[43] M. Elitzur Astrophysical Journal **370**, 407 (1991).
[44] A. Lyne y F. Graham-Smith *Pulsar Astronomy* (Cambridge University Press, Cambridge, 2012).
[45] W. Sparks, J.H. Hough, T.A. Germer, F. Robb y L. Kolokolova Planetary and Space Science **72**, 111 (2012).

[46] V. Beckman y C.R. Shrader *Active Galactic Nuclei* (Wiley-VCH, 2012).
[47] H.W. Lee Journal of the Korean Astronomical Society **44**, 59 (2011).
[48] K.M. Baek, J.H. Bang, Y-K. Jeon, S. Kang y HW. Lee Journal of the Korean Astronomical Society **40**, 1 (2007).