



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA FÍSICA

**CONSTRUCCIÓN DEL MAPA DE MOMENTOS DE LA GALAXIA
NGC-4321 MEDIANTE PROCESAMIENTO DE IMAGEN BASADO
EN LA TÉCNICA DE FLUJO DE HIDRÓGENO**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

FÍSICO

AUTOR: OSCAR ANDRÉS MARTÍNEZ ESPINOSA

DIRECTOR: Dr. RICHARD WILLIANS PACHACAMA CHOCA. PhD

Riobamba – Ecuador

2022

©2022, Oscar Andrés Martínez Espinosa

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, OSCAR ANDRÉS MARTÍNEZ ESPINOSA, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 13 de diciembre de 2022



Oscar Andrés Martínez Espinosa

110448980-0

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA FÍSICA

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto de Investigación. **CONSTRUCCIÓN DEL MAPA DE MOMENTOS DE LA GALAXIA NGC-4321 MEDIANTE PROCESAMIENTO DE IMAGEN BASADO EN LA TÉCNICA DE FLUJO DE HIDRÓGENO**, realizado por el señor **OSCAR ANDRÉS MARTÍNEZ ESPINOSA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud, el Tribunal autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Dr. Luis Marcelo Cortez Bonilla PhD. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2022-12-13
Dr. Richard Willians Pachacama Choca PhD. DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2022-12-13
Mgs. Bruno Micciola MSc. ASESOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2022-12-13

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a todas las personas que, de forma directa o indirecta, fueron un apoyo a lo largo de todo este proceso; a quienes me aportaron motivación e inspiración, tanto en el ámbito académico como personal.

Oscar

AGRADECIMIENTOS

Mi sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo por brindarme la formación necesaria para desarrollar mi perfil tanto profesional como social. He tenido la oportunidad de adquirir nuevas experiencias en diversas áreas que, como resultado, permiten una formación más holística y competitiva. De igual forma, expreso mi extenso agradecimiento al Dr. Richard Pachacama Choca, director del presente Trabajo de Integración Curricular por su constante apoyo, asesoramiento y motivación, factores que han hecho de la realización de este trabajo un proceso más ameno y eficiente. Finalmente, me dirijo al Sr. Elvyn Ojeda Guaicha, quien estuvo presente de forma activa en todo el desarrollo del trabajo; fue un pilar fundamental tanto en el aspecto académico como anímico aportando su conocimiento y criterio con la finalidad de obtener los mejores resultados posibles.

Oscar

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	ix
ÍNDICE DE ECUACIONES	x
ÍNDICE DE ANEXOS	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	3
1.1. Antecedentes de investigación	3
1.2. Justificación.....	4
1.3. Planteamiento del Problema.....	4
1.4. Bases teóricas	5
1.4.1. Breve descripción de las galaxias.....	5
1.4.2. Clasificación de las galaxias	5
1.4.2.1. Galaxias espirales	6
1.4.2.2. Galaxias elípticas	6
1.4.2.3. Galaxias irregulares.....	7
1.4.3. Galaxia M100 (NGC 4321)	8
1.4.4. Espectro electromagnético.....	9
1.4.5. Radiación electromagnética como fuente de información astronómica	9
1.4.6. Átomo de hidrógeno.....	11
1.4.7. Líneas espectrales	13
1.4.8. Ley de Hubble	14
1.4.9. Desplazamiento Doppler Relativista	16
1.4.10. Otros parámetros galácticos	17
1.4.10.1. Luminosidad, brillo e irradiancia.....	17
1.4.10.2. Masa	19
1.4.10.3. Temperatura	21
1.4.10.4. Potencial gravitacional	22
1.4.10.5. Declinación y ascensión recta (localización).....	23
1.4.11. Breve introducción al procesamiento de imagen.....	24
1.4.12. Definición de Data Cube	25
1.4.13. Mapas de momento	25

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO	27
2.1.	Enfoque de investigación	27
2.2.	Nivel de investigación	27
2.3.	Diseño de investigación	27
2.3.1.	<i>Según la manipulación o no de la variable</i>	27
2.3.2.	<i>Según las intervenciones en el trabajo de campo</i>	27
2.4.	Tipo de estudio	27
2.5.	Población, planificación, selección y cálculo del tamaño de la muestra	28
2.6.	Métodos, técnicas e instrumentos de investigación	28
2.6.1.	<i>Herramientas informáticas</i>	28
2.6.1.1.	<i>Jupyter Notebook</i>	28
2.6.1.2.	<i>Anaconda</i>	28
2.6.1.3.	<i>Python</i>	29
2.6.1.4.	<i>Librerías de Python</i>	29
2.6.1.5.	<i>Paquetes de Python</i>	30
2.6.2.	<i>Metodología del procesamiento de imagen</i>	31
2.6.2.1.	<i>Técnica del flujo de hidrógeno</i>	31
2.6.2.2.	<i>Archivos Fits</i>	32
2.6.2.3.	<i>Testeo de datos</i>	32
2.6.2.4.	<i>Ploteo de algunos planos del data cube</i>	33
2.6.2.5.	<i>Promedios</i>	34
2.6.2.6.	<i>RMS</i>	34
2.6.2.7.	<i>Cálculo estimado de la masa</i>	35
2.6.2.8.	<i>Momento 0</i>	36
2.6.2.9.	<i>Momento 1</i>	36
2.6.2.10.	<i>Momento 2</i>	37

CAPÍTULO III

3.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	38
3.1.	Velocidad de recesión y masa	38
3.2.	Mapa de momento 0	39
3.3.	Mapa de momento 1	40
3.4.	Mapa de momento 2	43

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-2:	Imagen del telescopio Hubble de la galaxia M100.	8
Ilustración 2-2:	Penetración de ondas electromagnéticas en la atmósfera terrestre.	10
Ilustración 3-2:	Transiciones energéticas del átomo de hidrógeno.	13
Ilustración 4-2:	Líneas de emisión (superior) y absorción (inferior) del hidrógeno.	14
Ilustración 5-2:	Relación entre la velocidad de recesión de una galaxia y su distancia.	15
Ilustración 6-2:	Relación entre corrimiento al rojo de una galaxia y velocidad de recesión... ..	17
Ilustración 7-2:	Curva de rotación en función del radio.	20
Ilustración 8-2:	Representación gráfica de un espectro continuo.	26
Ilustración 9-3:	Vista general del data cube.	32
Ilustración 10-3:	Matrices de información del data cube.	33
Ilustración 11-3:	Planos aleatorios de la galaxia NGC 4321.	33
Ilustración 12-3:	Imagen preliminar de la galaxia NGC 4321.	34
Ilustración 13-3:	Raíz cuadrada media.	35
Ilustración 14-4:	Densidad de flujo en función de la velocidad.	38
Ilustración 15-4:	Mapa de momento 0	40
Ilustración 16-4:	Mapa de momento 1.	41
Ilustración 17-4:	Mapa de momento 1 (sin ruido).	42
Ilustración 18-4:	Mapa de momento 2.	43

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación N.1: Relación entre energía y frecuencia	9
Ecuación N.2: Primer postulado del modelo de Bohr.....	11
Ecuación N.3: Longitud de onda de de Broglie	11
Ecuación N.4: Transición energética del electrón.....	12
Ecuación N.5: Relación entre longitud de onda y transición energética.....	12
Ecuación N.6: Corrimiento al rojo.....	15
Ecuación N.7: Velocidad de recesión de una galaxia	15
Ecuación N.8: Velocidad de recesión en función del corrimiento al rojo.....	16
Ecuación N.9: Corrimiento al rojo relativista	16
Ecuación N.10: Función de luminosidad de una galaxia	18
Ecuación N.11: Teorema del Virial	19
Ecuación N.12: Energía cinética de una galaxia.....	19
Ecuación N.13: Energía potencial de una galaxia.....	19
Ecuación N.14: Masa de la galaxia en función de las líneas espectrales	19
Ecuación N.15: Masa de la galaxia en función de su curva de rotación	19
Ecuación N.16: Masa de hidrógeno presente en una galaxia.....	21
Ecuación N.17: Temperatura de brillo	21
Ecuación N.18: Temperatura de antena	22
Ecuación N.19: Temperatura cinética.....	22
Ecuación N.20: Potencial gravitatorio generado por una distribución de masa.....	22
Ecuación N.21: Potencial gravitatorio para una masa puntual.....	23

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: ANÁLISIS DEL DATA CUBE TRIDIMENSIONAL

ANEXO B: PLOTEO Y OBTENCIÓN DE VALORES MEDIOS

ANEXO C: DETECCIÓN DEL VALOR MEDIO

ANEXO D: DISTANCIA Y MASA DE LA GALAXIA

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue obtener información sobre las propiedades físicas de la galaxia NGC 4321 aplicando procesamiento de imagen a su data cube basado en la técnica de flujo de hidrógeno. Empleando el lenguaje de programación de Python en conjunto con algunas de sus librerías y paquetes se ejecutó un código para la obtención de los mapas de momento, cuya interpretación física se realizó en función de las características de la radiación electromagnética del hidrógeno. Los resultados obtenidos muestran que la galaxia NGC 4321 se acerca a la Vía Láctea a razón de 1410.35 km/s aproximadamente; lo cual, aplicando la ley de Hubble sugiere que la galaxia se encuentra a una distancia de 19.32 Mpc. La técnica de flujo de hidrógeno permitió encontrar información sobre la masa y temperatura de la galaxia NGC 4321, cuyos valores promedio fueron: $4.3199 \times 10^{10} M_{\odot}$ y 463445.05 K respectivamente. El mapa de momento 0 mostró, de manera descriptiva, la distribución de la masa de la galaxia; el mapa de momento 1 permitió deducir la rotación de la galaxia a partir de su velocidad de recesión y el mapa de momento 2 proporcionó información sobre la temperatura a partir de la radiación espectral. Esto permite concluir que la galaxia NGC 4321 se mueve en dirección a la Vía Láctea y que sus parámetros de masa y temperatura concuerdan con la información teórica disponible, por lo cual se propone profundizar las investigaciones sobre el comportamiento de esta galaxia para contrastar los resultados obtenidos.

Palabras clave: <GALAXIA NGC 4321>, <MAPA DE MOMENTO>, <DATE CUBE>, <FLUJO DE HIDRÓGENO>, <PYTHON>.



0607-DBRA-UPT-2023

ABSTRACT

The aim of this work was to obtain information about the physical properties of the galaxy NGC 4321 by applying image processing to its data cube based on the hydrogen flow technique. Using the Python programming language in conjunction with some of its libraries and packages, a code was run to obtain the momentum maps, whose physical interpretation was made based on the characteristics of the electromagnetic radiation of hydrogen. The results show that the galaxy NGC 4321 is approaching the Milky Way at a rate of approximately 1410.35 km/s, which, applying Hubble's law, suggests that the galaxy is at 19.32 Mpc. The hydrogen flow technique allowed us to find information on the mass and temperature of the galaxy NGC 4321, whose average values were: $4.3199 \times 10^{10} M_{\odot}$ and 463445.05 K respectively. The momentum map 0 showed, descriptively, the mass distribution of the galaxy; momentum map 1 allowed us to deduce the rotation of the galaxy from its recessional velocity and momentum map 2 provided information on the temperature from the spectral radiation. This allows us to conclude that the galaxy NGC 4321 is moving in the direction of the Milky Way and that its mass and temperature parameters agree with the available theoretical information. We propose to further investigate the behaviour of this galaxy in order to verify the results obtained.

Key words: <GALAXY NGC 4321>, <MOMENTUM MAP>, <DATA CUBE>, <HYDROGEN FLOW>, <PYTHON>.



Lic. Carmita Rojas Castro MSc.

0602890469

INTRODUCCIÓN

Las galaxias son una de las principales estructuras celestes del universo y su estudio ha permitido el desarrollo significativo del ámbito astronómico; el uso de mapas de momento es una herramienta muy útil para obtener y analizar la información sobre las propiedades físicas de las galaxias, derivada de su relativa baja complejidad y costo de ejecución. El objetivo de este trabajo fue obtener información sobre las propiedades físicas de la galaxia NGC 4321 aplicando procesamiento de imagen a su data cube basado en la técnica de flujo de hidrógeno.

Para la parte experimental de este trabajo se partió de un archivo de datos matricial compuesto por 63 bloques de información de la galaxia NGC 4321 previamente recopilados por observaciones realizadas usando diversos telescopios. Empleando el lenguaje de programación de Python en conjunto con algunas de sus librerías y paquetes se ejecutó un código para la obtención de los mapas de momento, cuya interpretación física se realizó en función de las características electromagnéticas del hidrógeno. Este trabajo se encuentra dividido de la siguiente manera: en el capítulo se plantea el problema de investigación y los objetivos del presente trabajo; en el capítulo 2, que corresponde al marco teórico se presentan una descripción de los principales conceptos teóricos, útiles para el análisis de los resultados obtenidos; en el capítulo 3 de metodología se describe de manera sistemática y concisa el proceso y las herramientas empleadas; en el capítulo 4 se exponen los resultados obtenidos y se analiza su significado físico, y por último se presentan las conclusiones y recomendaciones.

La información galáctica existente es muy diversa, especialmente de las galaxias lejanas como la NGC 4321, debido a la gran cantidad y naturaleza de las variables involucradas, por lo tanto, los resultados obtenidos en este trabajo servirán como herramienta de consulta y aportarán a consolidar las bases de datos existentes.

OBJETIVOS

Objetivo general

Obtener información sobre la masa, movimiento y temperatura de la galaxia NGC 4321 mediante procesamiento de imagen aplicado a su data cube.

Objetivos específicos

- Dar una descripción básica sobre los principales conceptos que se vayan a emplear en el desarrollo del trabajo, tanto a nivel teórico como metodológico.
- Aplicar procesamiento de imagen con el software Python al data cube de la galaxia NGC 4321 mediante el método de flujo de hidrógeno.
- Obtener información sobre la temperatura, masa y densidad de hidrógeno de la galaxia y construir el correspondiente mapa de momentos a partir de estos datos.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Antecedentes de investigación

Los antecedentes del estudio galáctico tienen origen con las observaciones del astrónomo persa Abd Al-Rahman Al Sufi, quien alrededor del año 950 fue el primero en reportar un leve destello de luz proveniente de la constelación Andrómeda. Siglos después, en 1780, Charles Messier, un astrónomo de origen francés publicó sus investigaciones donde describía el comportamiento y características de 32 objetos no estelares; posteriormente, extendió su trabajo con una publicación denominada Catálogo de Nebulosas y Cúmulos de Estrellas, donde enlista más de 100 objetos astronómicos que, años después, se conocerían como galaxias. En la actualidad, dichas galaxias se las identifica con el prefijo M, haciendo referencia al astrónomo francés; por ejemplo, la galaxia Andrómeda se conoce como M31. A inicios del siglo XIX, miles de galaxias fueron descubiertas y eventualmente clasificadas gracias a las investigaciones de los hermanos alemanes William y Caroline Herschel. También generaron valiosos aportes en la elaboración de nuevos telescopios y técnicas de observación astronómica. En 1912, Vesto M. Slipher, un astrónomo perteneciente al Observatorio Lowell de Arizona observó los primeros fenómenos que sugerían que las galaxias se alejaban de forma continua respecto a nuestra ubicación. Determinó que el espectro de radiación emitido por las galaxias se había sufrido un corrimiento al rojo. Esta información fue empleada por Edwin Hubble como indicador que las galaxias se alejan unas de otras, proponiendo la expansión del universo como hipótesis (Freedman, Kaufmann III 2008, pp. 635-640).

En referencia a trabajos más contemporáneos, se puede citar la tesis de licenciatura en Física realizada por Mayra Mabel Valerdi Negreros perteneciente a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, el cual titula Evolución de Galaxias en Cúmulos. En dicho trabajo se enlistan diversos conceptos relacionados con la composición, comportamiento y características de las galaxias; además, se realiza un procesamiento de imagen a un conjunto de datos obtenidos por satélites de dos cúmulos galácticos, obteniendo información importante sobre el movimiento de dichos cúmulos respecto a la Tierra (Valerdi Negreros, 2013).

1.2. Justificación

El presente trabajo se enfocará en procesar el data cube de la galaxia NGC 4321 con la finalidad de realizar un análisis a los resultados y elaborar mapas de momento de la galaxia con dicha información. La importancia de conocer los datos de movimiento y otras propiedades físicas de las galaxias, al igual que la metodología para poder obtener dichos datos, yace en incentivar el desarrollo de nuevas líneas de investigación en el país enfocadas en esta área, dado la poca información que se puede encontrar sobre el tema con autoría nacional. A pesar de que a nivel local se emplea el procesamiento de imagen en una amplia gama de investigaciones y trabajos, no existe una tendencia a usarlo en ramas como astronomía o astrofísica; esto puede significar una gran oportunidad de generar publicaciones pioneras que promuevan el estudio de esta área de investigación y, por consecuente, ampliar el panorama científico del país. De igual forma, los resultados obtenidos en este trabajo se pueden contrastar con otras metodologías de investigación que se hayan realizado, hecho que es de vital importancia dentro del ámbito científico dado que permite tener una idea de posibles sesgos o errores. Cabe mencionar que la galaxia NGC-4321 (también conocida como Galaxia Espiral M100) comparte similitud en ciertas características físicas con Andrómeda (galaxia más próxima al planeta Tierra), entre ellas, un valor de luminosidad bastante cercano; sin embargo, no existe suficientes trabajos que estudien su estructura o comportamiento, convirtiéndola en un objeto de investigación bastante atractivo.

1.3. Planteamiento del problema

La programación es una disciplina que proporciona innumerables herramientas las cuales pueden ser empleadas en el ámbito científico para optimizar, profundizar y enriquecer los procesos de investigación, principalmente en áreas que puedan requerir procesar y analizar grandes librerías de datos tales como astronomía y astrofísica; en virtud de esto, se propone la siguiente investigación en la cual se dará una introducción general a los temas de astrofísica y mecánica celeste que se emplearán en el trabajo, luego, una descripción básica sobre la estructura, composición y comportamiento de las galaxias. Posterior a esto, se aplicará un procesamiento de imagen (basado en el método de flujo de hidrógeno) al data cube de la galaxia NGC 4321, todo esto empleando el software Python. Se obtendrán resultados tales como temperatura, masa y densidad de hidrógeno de la galaxia, a los cuales se les realizará otro procesamiento que permitirá desarrollar y obtener el mapa de momentos correspondiente. Finalmente, se realizará una análisis físico y estadístico de dicho mapa, con lo cual obtendremos información importante sobre las condiciones de movimiento y características físicas de la galaxia.

1.4. Bases teóricas

1.4.1. Breve descripción de las galaxias

Las galaxias son agrupaciones de miles de millones de estrellas que, a su vez, son los componentes fundamentales del Universo. Dichos cuerpos celestes, en conjunto con gas y polvo interestelar, trazan su órbita alrededor del centro de la galaxia como resultado de la atracción gravitatoria que se genera. Cuando una estrella culmina su proceso de evolución, usualmente reintegra grandes cantidades de gas al medio interestelar; dicho gas se condensa en regiones denominadas nubes moleculares para ser empleado en la formación de nuevas estrellas. A pesar de que los cuerpos celestes dentro de una galaxia están separados por distancias muy grandes comparadas con sus tamaños, las galaxias distan de sus vecinas más cercanas por distancias relativamente cortas. Esto permite que la colisión entre galaxias sea un fenómeno usual. Existen casos donde dicha colisión puede alterar débilmente la órbita de algunas estrellas y estimular la compresión de las nubes de gas, elevando considerablemente la tasa de formación de estrellas.

En el centro de muchas galaxias hay un núcleo compacto que, en ocasiones, suele ser tan brillante que opaca al resto de radiación que emite la galaxia. La luminosidad de las galaxias más brillantes puede alcanzar valores de 10^{12} luminosidades solares (L_{\odot}), pero la mayoría de ellas son mucho más tenues; los valores más bajos que se han registrado rondan los $10^5 L_{\odot}$. Debido a que las galaxias no poseen un borde exterior perfectamente definido, la masa y el radio dependen, en cierto grado, de dicho valor de luminosidad. Si solo se incluye la parte central, una galaxia gigante puede registrar una masa alrededor de 10^{13} masas solares (M_{\odot}) y un radio de 30 kiloparsec. Además, parece que la parte exterior de la mayoría de galaxias contienen grandes cantidades de materia no luminosa que podría aumentar la masas en un orden de magnitud. La densidad de la materia puede variar entre sectores dentro de la misma galaxia. De este modo la evolución de una galaxia será el resultado de procesos ocurriendo en escalas de tiempo y energía (Karttunen et al. 2007, p. 367).

1.4.2. Clasificación de las galaxias

Alrededor de 1930, el astrónomo Edwin Hubble fue el primero en establecer una clasificación morfológica de las galaxias en 4 tipos básicos: espirales, espiral barrada, elípticas e irregulares. Este esquema considera únicamente la apariencia visual de la galaxia, no toma en cuenta otros parámetros tales como la tasa de formación estelar, índices de color, la actividad del núcleo galáctico, parámetros espectroscópicos, etcétera. Debido a esto, en los últimos años se han hecho muchas modificaciones y mejoras, pero la clasificación morfológica definida por el Hubble sigue siendo hoy en día la más conocida (Freedman, Kaufmann III 2008, p. 639).

1.4.2.1. *Galaxias espirales*

Este grupo de galaxias consta de un disco con forma espiral, con brazos y un abultamiento central. Se pueden distinguir dos subgrupos: espirales normales (S) y espirales barradas (SB). En comparación con las elípticas, las espirales cubren una gama menor de masa. El margen de magnitud bolométrica oscila entre $10^9 M_{\odot}$ y $10^{12} M_{\odot}$. Los brazos espirales se caracterizan por ser regiones con una coloración más azul y contener estrellas relativamente jóvenes. Este tipo de galaxias cuenta con un halo que las rodea formado principalmente por gas intergaláctico y estrellas adultas. El perfil de brillo de la protuberancia de espirales se describe mediante un perfil de Vaucouleurs (el cual indica que la brillantez de la superficie galáctica cambia en función de la distancia aparente desde el centro), mientras que el disco se rige a un perfil de brillo exponencial (Freedman, Kaufmann III 2008, p. 639).

- Espirales normales: las galaxias dentro de esta categoría poseen un disco galáctico plano; tanto los brazos, el abultamiento central (con un núcleo de alta densidad) y amplio halo de estrellas débiles y longevas se encuentran en dicho disco (Sánchez Gil 2011, p. 3). En el esquema de Hubble, una galaxia espiral se identifica con la letra S y posee 3 clasificaciones: a, b y c.
- Espirales barradas: difieren del resto de galaxias espirales por la presencia de una barra alargada que pasa por el centro y posee material estelar e interestelar el cual afecta el movimiento de las estrellas. Dentro de la clasificación de Hubble, una galaxia espiral barrada se identifica mediante SB, y posee tres categorías: SBa, SBb y SBc. La simetría axial de la galaxia se ve afectada por la presencia de esta barra, lo cual puede generar ciertas alteraciones, entre ellas, una redistribución del momento angular de algunas estrellas, modificación de órbitas y una concentración del gas galáctico en el centro nuclear (Freedman, Kaufmann III, 2008, p. 641).

1.4.2.2. *Galaxias elípticas*

Galaxias elípticas, llamadas así por su forma claramente elíptica, no cuentan con brazos espirales. Hubble subclasificó estas galaxias en función de su aspecto esférico o achatado. Las galaxias elípticas más redondas se denominan E0 y las más planas, galaxias E7. Este tipo de galaxias proyectan ser mucho menos dramáticas en comparación con las espirales y espirales barradas. Se considera que la razón de este hecho es que, tal como se ha evidenciado mediante observaciones de radio frecuencia e infrarrojo, es que las elípticas están relativamente desprovistas de gas y polvo interestelar. Por lo tanto, hay carencia de material que haya permitido formaciones recientes de estrellas, y de hecho, no hay evidencia de estrellas jóvenes en la mayoría de las galaxias elípticas. Esto sugiere que la formación de estrellas en las galaxias elípticas ha terminado hace bastante tiempo, provocando que estén compuestas principalmente de viejas estrellas rojas

pertenecientes a la Población II (conjunto de estrellas que se caracterizan por ser extremadamente masivas, luminosas y calientes, virtualmente sin metales). La luz visible que es emitida por una galaxia depende directamente de las estrellas contenidas en ella, por lo que el espectro de luz visible posee líneas de absorción; sin embargo, debido a que las estrellas de una galaxia están en movimiento, algunas se acercan y otras se alejan de nosotros, provocando que el efecto Doppler difumine y amplíe las líneas de absorción. Estudiar los detalles de esta ampliación puede brindar información muy importante sobre el movimiento promedio de las estrellas dentro de la galaxia. Se ha demostrado que, para el caso de las elípticas, el movimiento estelar tiene un carácter significativamente aleatorio. En una galaxia tipo E0, esta aleatoriedad se considera isotrópica, lo que implica que las estrellas se trasladan en todas las direcciones, otorgando la forma esférica a la galaxia. Por otra parte, en el caso de las galaxias tipo E7, la aleatoriedad es anisotrópica, lo que significa que los rangos de velocidad de las estrellas no es el mismo en todas las regiones de la galaxia. Hubble también distingue a aquellas galaxias que poseen una apariencia intermedia entre una elíptica y una espiral, y las denominó galaxias lenticulares; poseen un bulto central y un disco tal como las galaxias espirales, pero carecen de brazos perceptibles (Freedman, Kaufmann III, 2008, pp. 641-642) .

1.4.2.3. Galaxias irregulares

Aquellas galaxias que no encajan en la categoría de espirales o elípticas, suelen denominarse galaxias irregulares. Por lo general, poseen una amplia cantidad de gas y polvo interestelar, y se conforman tanto de estrellas jóvenes como viejas. Debido a que no existe un mejor esquema de clasificación, este tipo de galaxias se suelen ubicar entre los extremos del diagrama de Hubble. Se identifican dos tipos de galaxias irregulares: Irr I y Irr II. El primer tipo posee leves indicios de una estructura organizada, y tienen muchas asociaciones OB (cúmulo estelar unido por una fuerza gravitacional débil) y regiones H II (espacio con gran cantidad de hidrógeno atómico ionizado). Los ejemplos más conocidos de galaxias Irr I son la Gran Nube de Magallanes y la Pequeña Nube de Magallanes. Ambos son compañeros cercanos de nuestra Vía Láctea y se puede ver a simple vista desde latitudes del sur. Se conoce que nuestra galaxia es capaz de generar fuerzas de marea ejercidas sobre estas galaxias irregulares, ayudando a comprimir el gas interestelar y fomentando la formación de nuevas estrellas. El otro tipo de galaxia irregular (Irr II) tiene una forma asimétrica y distorsionada. Se sospecha que dicha forma fue causada por colisiones con otras galaxias o por actividad violenta en sus núcleos. M82 es un ejemplo de una galaxia Irr II (Freedman, Kaufmann III, 2008, pp. 642-643).

1.4.3. Galaxia M100 (NGC 4321)

Es una galaxia espiral que se encuentra a 52,5 millones de años luz de distancia respecto a la Tierra. Se ubica en la constelación Coma Berenices y su descubrimiento lo realizó por el astrónomo francés Pierre Méchain en el año de 1781. Se considera una de las galaxias más grandes y brillantes dentro del cúmulo de Virgo, posee una luminosidad bastante semejante a la de la galaxia de Andrómeda, convirtiéndola muy adecuada para esta investigación. Se han logrado encontrar casi media docena de supernovas en esta galaxia: SN 1901B, SN 1914A, SN 1959E, SN 1979C y SN 2006X. Messier 100 es una galaxia con brote estelar, el cual se ubica en un anillo alrededor del núcleo y cuyo radio se calcula alrededor de un 1 kilopársec. También se ha registrado la existencia de una barra interna con el mismo radio y perfectamente alineada con la barra principal. Se sospecha que dicho anillo ha provocado la formación de varias estrellas desde hace 500 millones de años aproximadamente en diferentes brotes de formación estelar apartados en el tiempo. Se conoce que esta galaxia cuenta al menos dos galaxias elípticas enanas cerca: NGC 4323 y NGC 4328, estando conectadas con la primera de ellas por un puente de material luminoso, y presenta una carencia de hidrógeno neutro, el cual no llega más allá del disco estelar, excepto en su región suroeste (NED, 2022).



Ilustración 1-2. Imagen del telescopio Hubble de la galaxia M100.

Realizado por: (Nemiroff, Bonnell 2018)

1.4.4. Espectro electromagnético

La luz tiene su origen gracias al movimiento de los electrones. Se cataloga como un fenómeno de naturaleza electromagnética y el humano solo es capaz de observar un pequeño rango de este fenómeno, una parte de un amplio conjunto de ondas electromagnéticas denominado espectro electromagnético. Se conoce que, tanto los campos eléctricos como magnéticos, cuando oscilan se regeneran entre sí y dan lugar a una onda electromagnética. Este tipo de ondas viajan con la misma velocidad en el vacío, sin importar su valor de frecuencia (Hewitt 2007, pp. 496-498). Se refiere al espectro electromagnético como la distribución de la radiación electromagnética de acuerdo con la energía, frecuencia o longitud de onda. Los diferentes rangos de este espectro proporcionan diferente tipo de información producto de la interacción entre la materia y la luz (radiación electromagnética). Si tenemos en cuenta la dualidad onda corpúsculo, esta se puede interpretar como onda o como partícula, de esta forma, una frecuencia o longitud de onda dada está asociada a un cuanto de luz llamado fotón, el cual posee una determinada energía. La siguiente ecuación describe la relación que existe entre la frecuencia y la energía.

$$E = hf \tag{1}$$

La energía de un fotón equivale a la diferencia de energía de dos estados cuánticos del material y esta diferencia depende de sus propiedades, por tanto, el espectro proporciona información muy útil para averiguar propiedades a cerca de objetos celestes tales como su composición química y movimiento, a través del efecto Doppler. Usualmente, se denomina espectro a la distribución de intensidad de la radiación electromagnética en función de su frecuencia, la cual es inversamente proporcional a su longitud de onda. No existe una desigualdad fundamental entre las ondas de radio, los rayos X o la luz visible; todos se consideran campos eléctricos y magnéticos que oscilan. Los límites de cada región del espectro no son rigurosamente exactos, sino que ellos se sobreponen con las regiones vecinas (Alzate López 2006, p. 82) .

1.4.5. Radiación electromagnética como fuente de información astronómica

Para poder observar un objeto astronómico, se requiere que exista algún tipo de señal que llegue a nosotros desde dicho objeto y sea capaz de aportar cierto tipo de información. En la mayoría de los casos, se consideran cuatro fuentes principales: neutrinos, rayos cósmicos, radiación gravitacional y radiación electromagnética, siendo esta última la más empleada.

La atmósfera terrestre representa un gran inconveniente para la astronomía. La atmósfera únicamente es transparente frente a pequeñas regiones del espectro electromagnético. A pesar de que la luz visible puede atravesar la atmósfera, esto no implica que los rayos de luz no se vean afectados por las perturbaciones en la atmósfera, lo que genera una degradación de la imagen astronómica. Además de la luz visible, las ondas de radio (en una determinada banda de longitud de onda) son capaces de llegar a la superficie de la Tierra, no obstante, si dicha onda supera los 10m de longitud de onda, no podrá llegar a nosotros desde fuentes astronómicas, dado que esta longitud de onda corresponde a la frecuencia del plasma de la ionosfera; esto significa que la ionosfera refleja ondas de radio con longitudes de onda superiores a unos 10 m. Debido a esto, regiones lejanas en la superficie de la Tierra pueden comunicarse con ondas de radio de longitud de onda larga a pesar de la curvatura de la superficie. Por lo tanto, se requiere usar longitudes de onda más cortas para hacer radioastronomía y longitudes de onda más largas para poder comunicarnos con regiones distantes en la Tierra. La radiación infrarroja cercana es absorbida principalmente por el vapor de agua, el cual permanece confinado en las capas inferiores de la atmósfera. Por lo tanto, es posible hacer astronomía en el infrarrojo cercano subiendo a la cima de una montaña en una región seca. Sin embargo, necesitamos ir por encima de la atmósfera de la Tierra para hacer astronomía ultravioleta o de rayos X, ya que la atmósfera superior absorbe la radiación en estas longitudes de onda (Choudhuri 2010, pp. 14-15).

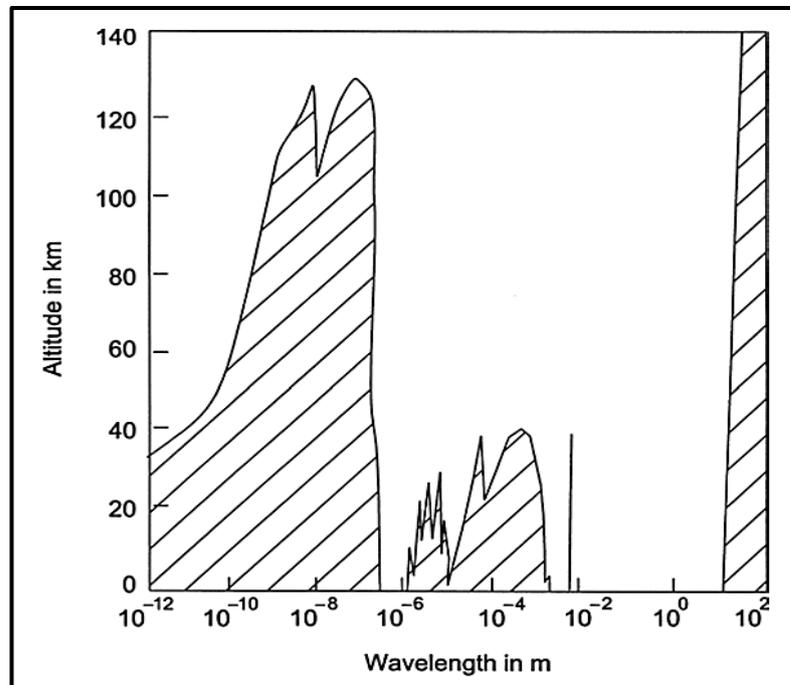


Ilustración 2-2. Penetración de ondas electromagnéticas en la atmósfera terrestre.

Realizado por: (Shu 1982, p. 17)

1.4.6. Átomo de hidrógeno

El hidrógeno es el elemento con mayor abundancia en el universo, no obstante, es muy complicado encontrarlo de forma libre en la Tierra. En contraste con el carbón u otros elementos, el hidrógeno no es un recurso natural, lo que implica que no se puede conseguir de la naturaleza mediante procesos de extracción. Este elemento es un excelente portador de energía, pero su principal atractivo a nivel astronómico es la capacidad que tiene de aportar información valiosa sobre un cuerpo celeste (Linares Hurtado, Moratilla Soria 2007, p. 13). El átomo de hidrógeno es el átomo más simple en la naturaleza, cuanta únicamente de un protón y un electrón. De acuerdo con el modelo de Bohr, el electrón describe una órbita circular alrededor del protón. Es importante mencionar que, a pesar de la poca relación que tiene este modelo con la realidad, funciona satisfactoriamente a la hora de describir y predecir ciertas propiedades del átomo de hidrógeno. El primer enunciado de este modelo nos indica lo siguiente:

$$mvr = \frac{nh}{2\pi} \quad (2)$$

Donde:

m = masa del electrón

v = velocidad del electrón

r = radio de la órbita

h = constante de Planck

n = número cuántico principal

La interpretación cuántica del primer postulado de Bohr nos indica que el electrón se puede representar como una onda estacionaria, y la longitud de la órbita debe ser múltiplo de la longitud de onda de de Broglie.

$$\lambda = \frac{h}{2\pi mv} \quad (3)$$

Todo esto son pautas que nos permitirán entender el comportamiento del átomo de hidrógeno e interpretar correctamente la información que podemos obtener de él. Se estima que este elemento representa casi el 84% de todos los átomos presentes en el universo observable, por ende, comprender sus propiedades, principalmente su espectro de emisión es una tarea fundamental dentro de la astronomía. Dicho espectro de emisión es la emisión característica de radiación electromagnética de este átomo a lo largo del espectro electromagnético.

Una partícula cargada que describe una órbita circular debería perder energía en forma de radiación electromagnética; esto implica que un electrón debería eventualmente dirigirse al núcleo debido a esta pérdida energética; sin embargo, Bohr, en su segundo postulado planteó que este fenómeno no ocurre, lo cual implica que un electrón en movimiento dentro de una órbita específica no emite radiación. Esto ocurre únicamente cuando dicho electrón salta de un estado de alta energía a otro menos energético. Conocemos gracias a la ecuación (1) que el fotón emitido posee una energía $E = hf$ que, para este caso en particular, corresponde a la diferencia energética entre los estados involucrados (Karttunen et al. 2007, p. 97).

$$hf = E_n - E_{n-x} \quad \text{donde } x < n \quad (4)$$

Ahora, es importante conocer una ecuación que nos permita relacionar esta transición energética del electrón con una longitud de onda en específico. Para ellos, debemos introducir la constante de Rydberg $R = 1.097 \times 10^7 m^{-1}$, la cual nos permite escribir la siguiente expresión:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{f}{c} \equiv R \left(\frac{1}{(n-x)^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (5)$$

Todo el conjunto de líneas espectrales producidas por la transición de $E_n \rightarrow E_2$ se conoce como serie de Balmer y es el único conjunto que se encuentra en el rango visible del espectro electromagnético. En caso de que el electrón regrese a su estado fundamental ($E_n \rightarrow E_1$), estamos hablando de una serie de Lyman, la cual se encuentra en el rango ultravioleta. De igual forma, podemos mencionar otras tres series de líneas espectrales: serie de Paschen ($E_n \rightarrow E_3$), serie de Bracket ($E_n \rightarrow E_4$), y finalmente, serie de Pfund ($E_n \rightarrow E_5$).

A continuación, se va a presentar un gráfico que indica las transiciones correspondientes al átomo de hidrógeno donde se indican todas las series previamente mencionadas. Las longitudes de onda de estas series de líneas espectrales son conocidas y pueden ser usadas para calibrar la longitud de onda del espectro estelar observado. Las líneas de Balmer se las puede interpretar como líneas de absorción oscuras las cuales convergen hacia el límite de ionización de Balmer, también conocido como la discontinuidad de Balmer ($\lambda = 364.7 \text{ nm}$) (Karttunen et al. 2007, p. 98).

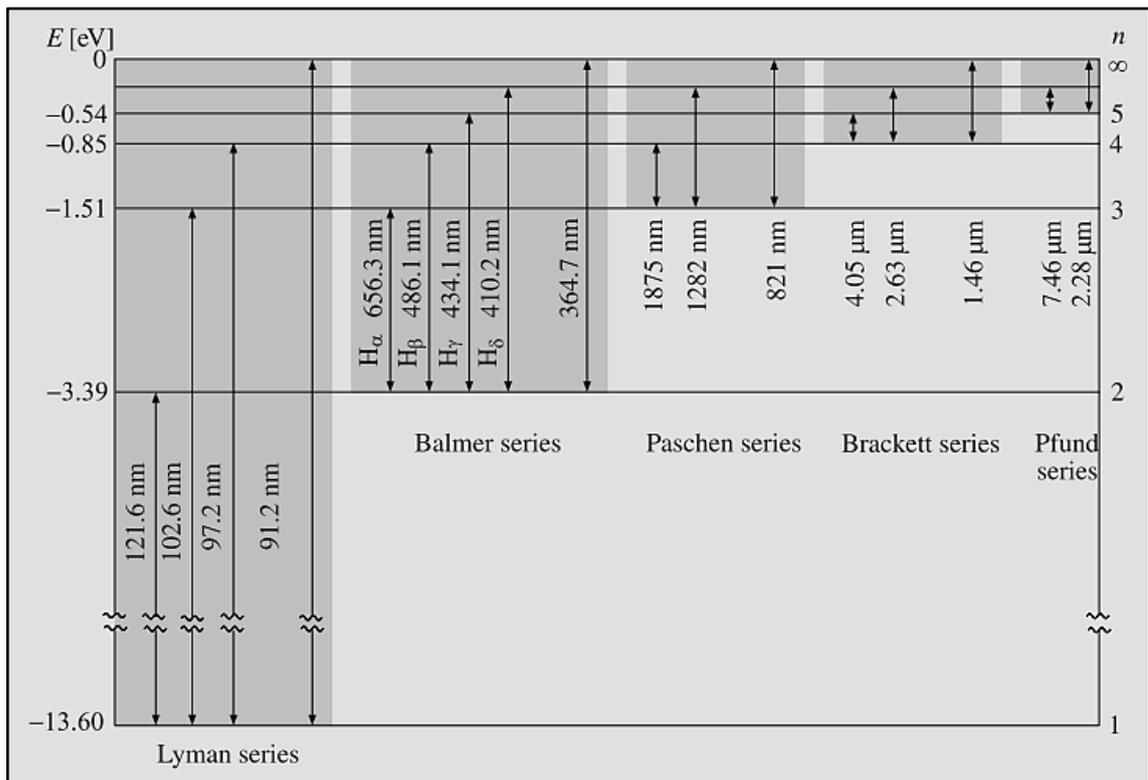


Ilustración 3-2. Transiciones energéticas del átomo de hidrógeno.

Realizado por: (Karttunen et al. 2007, p.98).

1.4.7. Líneas espectrales

Tal como se dio una pequeña introducción en el apartado anterior, una línea espectral es una línea que posee un cierto brillo (o es completamente oscura), producto de un exceso o déficit de fotones en un rango de frecuencias bastante estrecho. Cuando dichos fotones cuentan con la energía suficiente para cambiar el estado de energía de un sistema, estos serán absorbidos para ser reemitidos tiempo después. Se pueden distinguir líneas espectrales tanto de emisión como de absorción, y esto será determinado dependiendo del tipo de fuente luminosa y tipo de gas involucrado. Si construimos un sistema en el cual el gas se ubique entre la fuente de luz y un detector, a modo de que dicho detector sea capaz de observar el espectro emitido tanto por el gas como por la fuente, se podrá apreciar un descenso en la intensidad de la luz específicamente en la frecuencia con la cual el fotón fue emitido; esto significa que la mayoría de los fotones reemitidos posean una dirección diferente a la original, produciendo que se registre una línea de absorción. En caso de que el detector sea capaz de observar únicamente el espectro de emisión del gas, se registrarán sólo los fotones reemitidos, lo que se traduce en una línea de emisión.

La posición de las diferentes líneas espectrales se verá determinada dependiendo de la partícula (generalmente un átomo o molécula) que las genere. En consecuencia, estas líneas son muy útiles para poder establecer la composición química de un cuerpo cualquiera que admita que la luz pase a través de él. A lo largo de la historia, una gran variedad de elementos ha sido identificada gracias al uso de la espectrometría tales como el cerio, helio y talio. Es fundamental mencionar que la longitud de onda emitida por el hidrógeno neutro en reposo respecto al observador tiene un valor tabulado de 21,1061 cm, equivalente a 1,4204 GHz (Troccoli 1973, pp. 1-8).



Ilustración 4-2. Líneas de emisión (superior) y absorción (inferior) del hidrógeno.

Realizado por: Autor, 2022

1.4.8. Ley de Hubble

Alrededor de 1920, Edwin Hubble, en conjunto con el astrónomo Milton Humason, obtuvo fotografías del espectro de varias galaxias empleando un telescopio ubicado en California. Las observaciones de la luminosidad aparente y el periodo de pulsación dieron información importante que posteriormente sería empleada para determinar la distancia de dichas galaxias. Tanto Hubble como Humason apreciaron que la mayoría de las galaxias reportan un corrimiento al rojo en su espectro de emisión; conocemos gracias al efecto Doppler que esto nos indica que la fuente emisora se aleja respecto a nosotros. Pudieron concluir que existe una relación directa entre la distancia de una galaxia y su nivel de corrimiento al rojo. Esto se traduce en que aquellas galaxias relativamente cercanas, se alejan con una velocidad menor, mientras que aquellas que se encuentran a mayores distancias, también se alejan con una mayor velocidad. Este proceso universal de recesión que presentan los cuerpos celestes se conoce como el flujo de Hubble (FREEDMAN & KAUFMANN III, 2008, p. 647). El corrimiento al rojo (z) se obtiene tomando el valor de la longitud de onda observada λ , restar el valor de la longitud de onda original, sin desplazamiento λ_0 y, finalmente, dividir el resultado para λ_0 :

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \quad (6)$$

Tras obtener el valor del corrimiento al rojo de la galaxia, Hubble empleó la fórmula del efecto Doppler para poder determinar la velocidad con la cual dicha galaxia se aleja de nosotros (ecuación 8). Publicó su descubrimiento en el año de 1929, actualmente se lo conoce como la ley de Hubble. Sintetizado en una ecuación, nos indica que la velocidad de recesión de una galaxia v es igual a la constante de Hubble H_0 multiplicado por la distancia hacia dicha galaxia d :

$$v = H_0 d \quad (7)$$

Esta ecuación describe una línea recta que relaciona la velocidad de recesión con la distancia de la galaxia; también sugiere que la constante de Hubble posee un valor de $H_0 = 73 \text{ km/s/Mpc}$, lo que implica que, por cada millón de parsecs de distancia hacia una galaxia, la velocidad de recesión de esta incrementa en 73 km/s . Podemos deducir que, si una galaxia se encuentra a 100 millones de parsecs de distancia, esta se alejará de nosotros a 7300 km/s (Freedman, Kaufmann III 2008, p. 649).

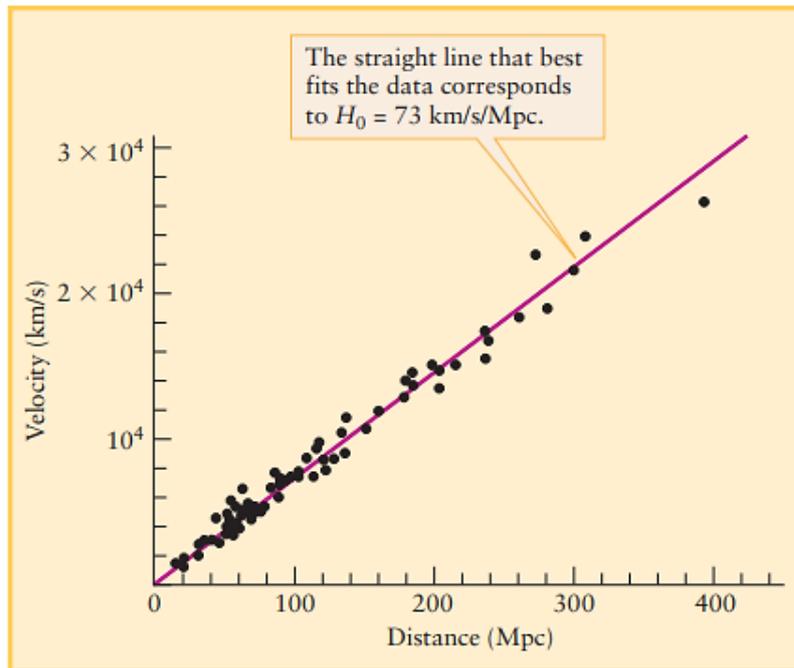


Ilustración 5-2. Relación entre la velocidad de recesión de una galaxia y su distancia.

Realizado por: (Freedman, Kaufmann III 2008, p. .649)

Es importante mencionar que, a pesar de ser uno de los valores más importantes dentro de la astronomía, la constante de Hubble no ha podido determinar con exactitud; por lo tanto, se ha convertido en una de las tareas más relevantes en el contexto astronómico actual. Además de permitirnos conocer la velocidad de recesión de galaxia extremadamente distantes, nos indica el ritmo con el cual el universo se está expandiendo. Debido a la incertidumbre respecto al valor de la constante, algunos astrónomos prefieren expresar el valor de la distancia de una galaxia en términos de su corrimiento al rojo (el cual si se puede establecer de forma precisa) indicando que, a mayor corrimiento al rojo presente en el espectro de emisión de una galaxia, mayor será la distancia a la que se encuentra de nosotros (Freedman, Kaufmann III 2008, p. 650).

1.4.9. Desplazamiento Doppler Relativista

Tal como se vio en la sección anterior, si conocemos (de forma aproximada) el valor de la constante de Hubble, podemos determinar la distancia que existe entre una galaxia y nosotros empleando la ecuación (7); sin embargo, se necesita conocer primeramente el valor de corrimiento al rojo del espectro de la galaxia (6), el cual nos permitirá deducir la velocidad de recesión mediante la siguiente expresión:

$$v = zc \tag{8}$$

Es importante mencionar que, para un cierto rango de velocidad de recesión (5% de la velocidad de la luz), podemos ignorar los efectos de la relatividad especial y trabajar sin problema alguno con la ecuación (6); no obstante, si dicho valor supera el 10%, es necesario trabajar con una ecuación relativista para el corrimiento al rojo:

$$z = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} - 1 \tag{9}$$

En el gráfico a continuación podemos ver la relación que existe entre el valor de corrimiento al rojo y la velocidad de recesión de un cuerpo celeste; además, se puede apreciar como la gráfica de z tiende al infinito a medida que v se aproxima a la velocidad de la luz:

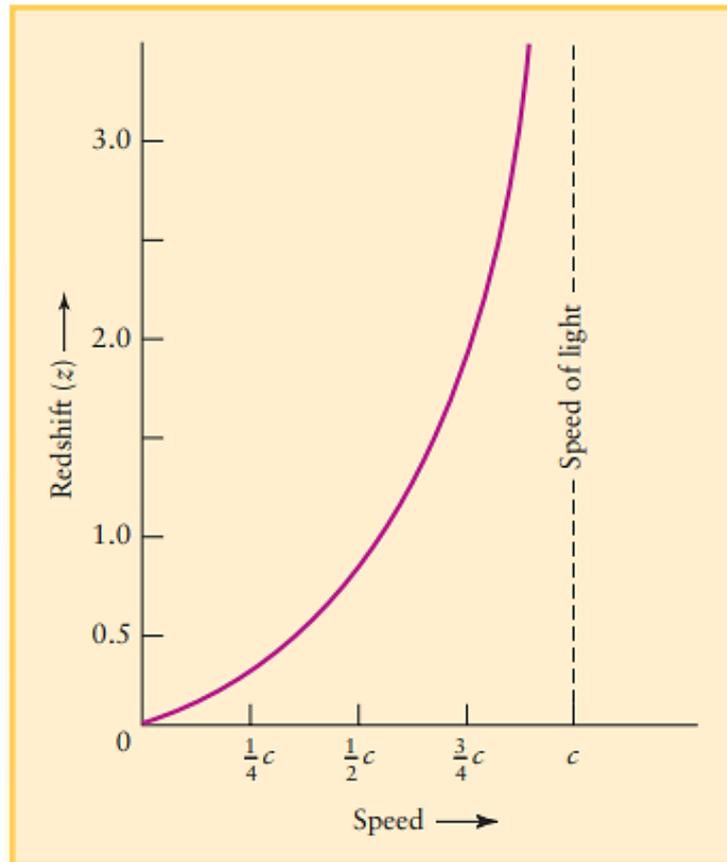


Ilustración 6-2. Relación entre corrimiento al rojo de una galaxia y su velocidad de recesión.

Realizado por: (Freedman, Kaufmann III 2008, p. 648)

1.4.10. Otros parámetros galácticos

En las secciones anteriores se ha tratado sobre la velocidad de recesión y distancia de una galaxia, parámetros que son fundamentales para estudiar y obtener información útil de cualquier cuerpo celeste, no obstante, es importante conocer otras propiedades para poder llevar a cabo un análisis más profundo. Para el caso particular del estudio galáctico, se espera conocer los valores de masa, luminosidad / brillo y temperatura de dicha galaxia. Esto permitirá deducir de forma más acertada la composición química, tamaño y otras propiedades físicas.

1.4.10.1. Luminosidad, brillo e irradiancia.

A pesar de que luminosidad y brillo son términos que, en cierta medida, describen la misma propiedad, no significan exactamente lo mismo. Se puede sintetizar en que la cantidad de luz emitida por una cierta fuente se denomina luminosidad, mientras que la cantidad de luz que recibe un observador ubicado a una determinada distancia de dicha fuente se denomina brillo aparente.

Estos conceptos son de bastante importancia a la hora de realizar un estudio astronómico. Para el caso de las galaxias, la definición de luminosidad es un poco arbitraria debido a lo complicado que es determinar un borde exacto. La convención habitual es medir la luminosidad de una galaxia a un valor dado del brillo de la superficie. Al igual que ocurre con las estrellas, la distribución de las luminosidades de las galaxias se describe mediante la función de luminosidad $\phi(L)$. Esto está definido a modo que la densidad espacial de galaxias con luminosidad entre $L + dL = \phi(L)dL$ (Karttunen et al. 2007, p. 373).

$$\phi(L)dL = \phi^* \left(\frac{L}{L^*}\right)^\alpha e^{-L/L^*} d\left(\frac{L}{L^*}\right) \quad (10)$$

Se ha de mencionar que los valores de ϕ^* , L^* y α se determinan mediante observación, esto implica que no sean cantidades fáciles de conocer. Por lo general, se crean funciones dependientes de la posición que permiten aproximar dichos valores.

La irradiancia, en términos generales, describe la potencia incidente de una radiación electromagnética sobre una superficie. También lo podemos entender como el promedio de la intensidad de una onda electromagnética en un espacio definido. Esta propiedad es bastante útil en el contexto astronómico dado que nos permite definir otras magnitudes similares utilizadas en radiometría que proporcionan información adicional sobre un cuerpo celeste, tales como la radiancia espectral (L_f) que es la medida de la radiación térmica de un cuerpo sobre todo el espectro electromagnético (medido en vatios por unidad de superficie, frecuencia y ángulo sólido), y la densidad de flujo espectral (S) que se obtiene al integrar la radiancia espectral sobre el ángulo solido fuente. En el contexto astronómico se suele emplear los Janskys (Jy) como unidad de densidad de flujo, lo cual equivale a $10^{-26} Wm^{-2}Hz^{-1}$. Existen otras equivalencias que relacionan a los Janskys con la radiancia espectral y la irradiancia, sin embargo, dichas equivalencias dependen de la frecuencia en reposo del elemento del cual se está estudiando la radiación, y de valores que se determinan mediante observación, esto implica que son cantidades difíciles de conocer (Karttunen et al. 2007, pp. 83-85).

En el caso del presente trabajo, el data cube procesado para la obtención de los mapas de momento ya cuenta con información sobre las unidades radiométricas de la galaxia, lo cual facilita el análisis físico y evita posibles errores relacionados con los cálculos matemáticos involucrados en la obtención de dichas magnitudes.

1.4.10.2. Masa

Por definición conocemos que la masa es una propiedad física de todos los cuerpos que nos indica la cantidad de materia que poseen. En un contexto galáctico, la mayor parte de la masa provendrá de las estrellas y del gas interestelar, a pesar de que dicha cantidad de masa no concuerda con ciertas propiedades gravitacionales que posee la galaxia, hecho que nos sugiere la existencia de materia oscura, tema del cual no se abordará en este trabajo. Conocer cómo se distribuye esta masa en una galaxia es algo de vital importancia, tanto para el ámbito cosmológico como para el desarrollo de teorías que describan el origen y evolución de las galaxias. De forma observacional, se puede aproximar la masa a partir de la velocidad de las estrellas y el gas interestelar. Por lo general, los resultados se suelen expresar en términos de la relación masa-luminosidad M/L . Para el caso específico de galaxias elípticas, la masa se puede calcular a partir de la energía cinética y potencial, las cuales se relacionan gracias al Teorema de Virial.

$$2K + U = 0 \quad (11)$$

$$K = Mv^2/2 \quad (12)$$

$$U = -GM^2/2R \quad (13)$$

El término K hace referencia a la energía cinética, U corresponde a la energía potencial del sistema, M es la masa total de la galaxia, v es el ancho de velocidad de las líneas espectrales, R es el radio promedio de la galaxia que se puede estimar o calcular a partir de la distribución de la luz y, G corresponde a la constante de gravitación universal. A partir de esta información, se puede deducir la siguiente ecuación:

$$M = 2v^2R/G \quad (14)$$

Ahora, para el caso de las galaxias espirales, su masa se suele obtener a partir de su curva de rotación v_R , la cual equivale a la velocidad de rotación de las estrellas observables o el gas en función de la distancia radial con el centro de la galaxia. Suponiendo que la mayor parte de la masa está en el abultamiento casi esférico de la galaxia, la masa dentro de un radio R , se puede estimar a partir de la tercera ley de Kepler:

$$M_R = v_R^2 R/G \quad (15)$$

Cabe mencionar que, en la parte exterior de algunas galaxias espirales, el valor de v_R no depende del radio R . Esto conduce a que la masa M_R dependa únicamente del radio; esto nos sugiere que mientras más extensa sea una galaxia, mayor será su masa interior. Para medir la masa en radios aún mayores donde no se puede detectar ninguna emisión, se deben usar los movimientos en los sistemas de galaxias. Una posibilidad es utilizar pares de galaxias. En principio, este método es el mismo que se emplea para el caso de las estrellas binarias. Los resultados actuales sugieren que a medida que se muestrean volúmenes de espacio más grandes, se obtienen valores más grandes para la relación masa-luminosidad. Por lo tanto, una gran fracción de la masa total de las galaxias debe estar en una forma invisible y desconocida, que se encuentra principalmente en las partes exteriores, tal como se indicó al comienzo de esta sección. Esto se conoce como el problema de la masa faltante y es una de las preguntas principales sin resolver de la astronomía y de la física en general (Karttunen et al. 2007, pp. 374-375). A continuación, se muestra un gráfico que indica la curva de rotación promedio de algunas galaxias.

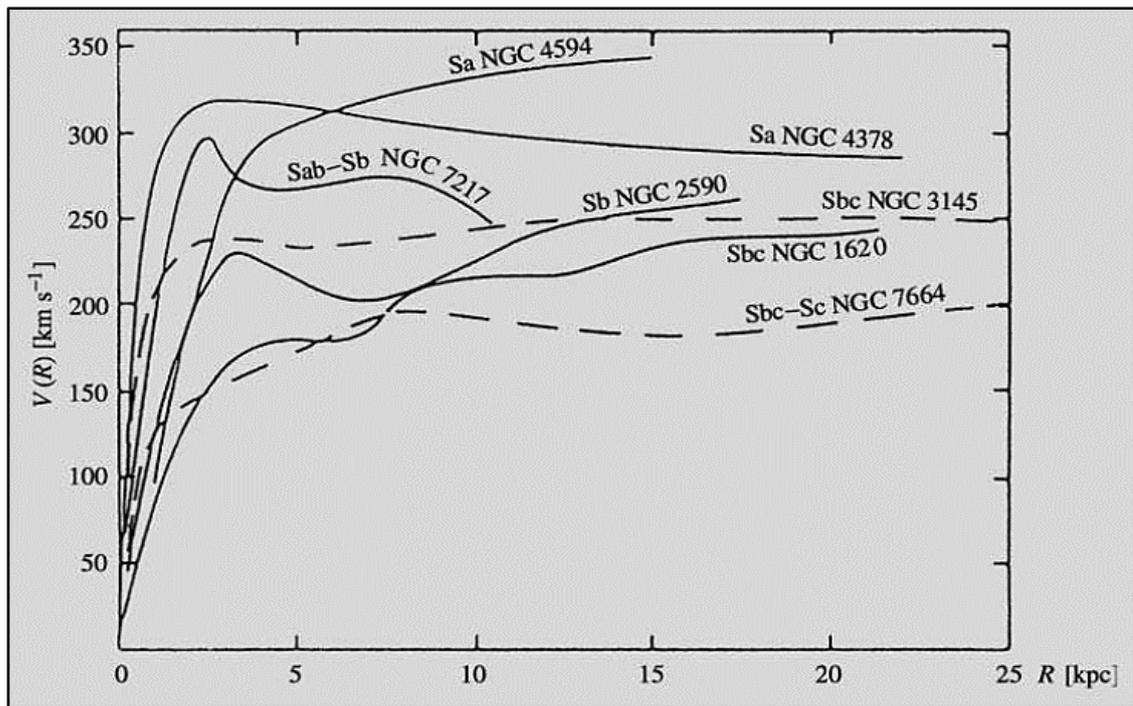


Ilustración 7-2. Curva de rotación en función del radio.

Realizado por: (Karttunen et al. 2007, p. 375)

Todo lo expuesto previamente corresponde a métodos para obtener la masa de una galaxia, sin embargo, y en función del título de este trabajo, nos centraremos en un método de obtención basado en las propiedades de radiación del átomo de hidrógeno empleando la siguiente ecuación:

$$\frac{M_H}{M_\odot} \cong (2.36 \times 10^5) \left(\frac{d}{Mpc}\right)^2 \int \left(\frac{S}{Jy}\right) \left(\frac{dv}{kms^{-1}}\right) \quad (16)$$

Donde d corresponde a la distancia que existe a la galaxia en estudio, S representa la densidad de flujo emitida por dicha galaxia y M_\odot es la unidad de masa solares. Es importante recalcar que esta expresión nos dará la cantidad de hidrógeno presente en la galaxia, más no la masa total.

1.4.10.3. Temperatura

La temperatura de los objetos astronómicos va desde casi el cero absoluto hasta millones de grados. La temperatura se puede definir de varias maneras y su valor numérico depende de la definición específica utilizada. Todas estas temperaturas diferentes son necesarias para describir diferentes fenómenos físicos y, a menudo, no existe una verdadera temperatura única. Se pueden distinguir tres tipos principales de temperaturas que aportan diferente información sobre un cuerpo celeste si se conocen unos parámetros previamente.

$$T_b = \frac{\lambda^2 L_f}{2k} \quad (17)$$

Esta expresión se conoce como temperatura de brillo, también conocida como temperatura de radiación, nos indica la temperatura a la que debería estar un cuerpo negro en equilibrio térmico con su entorno y que posee la misma superficie de brillo que el objeto observado. Es importante aclarar que esta ecuación será la que se emplee para obtener información sobre la temperatura de la galaxia en estudio.

Este valor depende de la constante de Boltzmann k , de la intensidad de emisión de la fuente a una frecuencia determinada L_f y de la longitud de onda de dicha frecuencia. La temperatura de brillo no corresponde a una temperatura tal como lo conocemos. Caracteriza la radiación y, dependiendo del mecanismo de dicha radiación, puede variar significativamente de la temperatura física de un cuerpo radiante (aunque, de forma teórica, es posible construir un sistema o dispositivo que se calentará gracias a una fuente de radiación con una temperatura de brillo a la temperatura de brillo igual a la temperatura real (Karttunen et al. 2007, p. 106).

A partir de este valor podemos obtener otro valor de temperatura conocido como temperatura de antena:

$$T_A = \eta T_b \quad (18)$$

Esta expresión nos indica la medida de temperatura registrada por un radio telescopio. Podemos observar que, además de depender de T_b también depende de la eficiencia de haz de la antena η , concepto que se puede definir como la relación entre la potencia radiada dentro del haz principal y la potencia total radiada. La eficiencia del haz se obtiene para aberturas rectangulares y circulares ideales, en función de la relación de amplitud de borde a centro. Finalmente, tenemos la temperatura cinética:

$$T_K = \frac{mv^2}{3k} \quad (19)$$

Esta expresión nos indica la temperatura de las moléculas de un gas en función de su velocidad. El término m corresponde a la masa de la molécula en estudio, v es su velocidad y el término k , tal como se indicó previamente, corresponde a la constante de Boltzmann. A partir de esto, podemos predecir la presión de un gas en función de la densidad numérica de las moléculas n . También se puede mencionar la temperatura de ionización T_i , la cual se encuentra comparando el número de átomos en diferentes estados de ionización. Dado que las estrellas no son exactamente cuerpos negros, los valores de las temperaturas de excitación de ionización suelen variar, dependiendo del elemento cuyas líneas espectrales se hayan utilizado para determinar la temperatura. En el equilibrio termodinámico, todas estas diversas temperaturas son iguales (Karttunen et al. 2007, p. 107).

1.4.10.4. Potencial gravitacional

En base a la mecánica newtoniana, el potencial gravitatorio sobre un punto se puede definir como la energía potencial que una masa adquiere al ser colocada en dicho punto y se mide en Joules sobre kilogramo (J/kg). Para obtener el valor del potencial gravitatorio generado por un cuerpo a una distancia específica del mismo, aplicamos la siguiente ecuación:

	$V = -G \int \frac{dm}{r}$	(20)
--	----------------------------	------

En caso de trabajar con una masa puntual y no con una distribución continua de masa, podemos simplificar la ecuación anterior de la siguiente forma:

	$V = -G \frac{M}{r}$	(21)
--	----------------------	------

En ambos casos, r corresponde a la distancia que existe desde el punto de referencia a cada uno de los puntos que componen a la masa que genera el potencial (o en el caso de ser masa puntual, a su centro); G es a la constante de gravitación universal, cuyo valor equivale a $6.6738 \times 10^{-11} Nm^2 kg^{-1}$ (Kalinova et al. 2022). Si aplicamos este concepto a un cuerpo celeste, específicamente a una galaxia, podemos obtener un contorno que rodee a dicha galaxia el cual nos delimita el espacio donde es posible percibir su potencial gravitacional. Para realizar este cálculo, se puede tratar la galaxia como un disco sólido y obtener la distancia desde el centro a la cual el valor de V es igual a cero, e integrar para toda la circunferencia del disco (2π); sin embargo, esta interpretación es muy poco precisa dado que la distribución de masa en una galaxia es irregular y el radio interno no es constante a diferencia de un disco sólido, esto implica que el radio interno va a depender directamente del ángulo θ .

1.4.10.5. Declinación y ascensión recta (localización)

Dentro del contexto astronómico, la ascensión recta constituye una de las coordenadas astronómicas que se emplean para localizar los objetos astronómicos sobre la esfera celeste, y utiliza como referencia la longitud terrestre (coordenada geográfica). La ascensión recta se mide a partir del punto Aries en horas, minutos y segundos en dirección este a lo largo del ecuador celeste. Al perímetro total de la Tierra (360°) le corresponden 24 horas, esto implica que una hora es equivalente a 15 grados y cada hora se divide en 60 minutos y cada minuto en 60 segundos. Por su parte, el ángulo de declinación corresponde al ángulo que forma un cuerpo astronómico con el ecuador celeste. La declinación se mide en grados sexagesimales y es positiva si se dirige al norte del ecuador celeste y negativa si se dirige al sur. Esta coordenada es equivalente a la latitud geográfica (que se mide sobre el ecuador terrestre). Es importante mencionar que el ecuador celeste consiste en la proyección del ecuador terrestre sobre la esfera celeste. Dicha proyección genera una circunferencia, su centro pasa por el centro de la Tierra y es perpendicular al eje de rotación de la Tierra. Debido a la inclinación que presenta el eje de rotación de la Tierra, el ecuador celeste tiene una inclinación de $\sim 23.5^\circ$ con respecto al plano de la órbita de la Tierra, llamado eclíptica (Karttunen et al. 2007, p. 89; American Institute of Physics 2022).

1.4.11. Breve introducción al procesamiento de imagen

El procesamiento digital de imágenes se considera un campo de investigación amplio y abierto. Las diferentes actividades del procesamiento digital de imágenes se pueden ver reflejados en campos como medicina, geología, pero poseen principal importancia en el contexto astronómico. En resumen, podemos mencionar que el procesamiento de imagen involucra generalmente un tratamiento de filtrado para disminuir o eliminar el ruido (variaciones y alteraciones de carácter aleatorio del brillo y/o color que no concuerda con la realidad) y técnicas para destacar ciertos detalles que se consideren importantes y normalizar el formato de las imágenes. La evolución de los diversos métodos de procesamiento de imagen tiene su origen principalmente en dos áreas de aplicación: el mejoramiento pictórico de la información para una adecuada interpretación humana y el tratamiento de datos de la imagen para la percepción de sistemas autónomos en el que se incluyen tanto etapas de transmisión como de almacenamiento de dichos datos. La herramienta más empleada en el tratamiento de la imagen son las matemáticas, a partir de las cuales se permite un desarrollo de algoritmos cada vez más complejos para optimizar este tipo de trabajos. Dentro de la astronomía, procesar imágenes es un método que busca limpiar o enaltecer ciertos detalles de una imagen tomada por telescopios que permitan apreciar de mejor forma algunas características estelares. La tecnología involucrada en este proceso implica tanto filtros como la ayuda de otra tecnología de telescopio denominada preprocesamiento de imágenes; luego, se enfoca en mejorar la resolución y agudizar los principales aspectos de la imagen. La calibración de imágenes, la alineación y la reducción de ruido se pueden considerar como los pasos fundamentales en este tipo de procesamiento de imagen. La calibración necesita suprimir datos no deseados para que lo que se está estudiando pueda entenderse con mayor claridad. Un método conocido como “filtro de paso bajo” disminuye el ruido que se encuentra en el rango de alta frecuencia, donde se eliminará las aberraciones en una imagen. Existen ciertos filtros que permiten diferenciar de mejor manera los colores primarios de luz roja, verde y azul, para efectos de gas de hidrógeno en el espacio. Este proceso conocido como filtrado de imagen se encuentra relacionado a longitudes de onda específicas y generalmente se diseña para trabajar en bandas tanto anchas como estrechas. La función principal de los filtros de banda ancha es registrar las variaciones en un color rojo en el espectro visible. Por otro lado, un filtro de banda estrecha está diseñado para bloquear toda la luz, excepto la de una longitud de onda característica de pocos nanómetros (Salinas et al. 2016).

1.4.12. Definición de Data Cube

Los almacenes de datos suelen contener una representación de hechos multidimensional de los datos que se pueden utilizar en cualquier tipo de análisis. Muchas aplicaciones materializan cubos de datos como matrices multidimensionales para un acceso rápido, directo y aleatorio a los valores. Dichos data cubes se utilizan para la exploración, con operaciones como resumen, desglose, corte y dados. Los data cubes pueden llegar a ser muy grandes, lo que aumenta significativamente la cantidad de entradas y salidas (E/S) debido a la necesidad de recuperar una gran cantidad de fragmentos de cubo. El gran costo asociado con la E/S conduce a un rendimiento degradado. El cubo de datos se puede comprimir, pero las técnicas de compresión tradicionales no lo hacen consultable, ya que comprimen y descomprimen bloques razonablemente grandes y tienen grandes costos asociados con la descompresión y el acceso indirecto. La representación multidimensional de data cube emplea celdas de un tamaño fijo lo cual brinda la principal ventaja de acceso completo y aleatoria de los datos, dado que la posición de cualquier valor es directamente computable desde el desplazamiento de cada eje de dimensión. El principal inconveniente de este tipo de representación es que puede ocupar gran cantidad de espacio, generando diversos problemas dependiendo de las características del sistema que los almacena y/o procesa (Furtado, Medeira 2000, pp. 162-167).

1.4.13. Mapas de momento

Desde una perspectiva matemática, los momentos son una forma de reducir el tamaño de un gran conjunto de datos en unos pocos números clave, por ejemplo, media, desviación estándar, etc. Un mapa de momentos es el resultado de repetir dicho proceso para cada píxel de una imagen creando un mapa. Por lo general, en astronomía, esto es útil cuando se trabaja con un amplio conjunto de datos tal como ocurre con un data cube. Es general, es una imagen donde cada píxel también posee un espectro. Las cámaras digitales normales designan un valor para el rojo, el verde y el azul en cada píxel, pero los radiotelescopios o los espectrógrafos de campo integral óptico le permiten obtener espectros completos, no solo 3 puntos de color. Es importante mencionar que no se puede, de forma simple, mostrar una imagen 2D de un data cube, porque es fundamentalmente un objeto tridimensional. Cuando se trabaja con espectros, los momentos también pueden tener un significado físico. Por lo general, los espectros se miden en función de la longitud de onda, pero se puede calcular los valores de desplazamientos al rojo/azul para hacer que su espectro sea una función de la velocidad relativa (en la dirección radial).

El momento 0 da información aproximada sobre la cantidad de gas en cada píxel (densidad de columna). El primer momento indica si la mayor parte de esa masa se está moviendo hacia ti o alejándose de ti, lo cual puede dar información sobre el estado de rotación de dicha galaxia. El segundo momento depende de la naturaleza de los datos presentes en el data cube, dado que puede mostrar información sobre la distribución de la dispersión de velocidad al igual que información sobre la temperatura de la galaxia. Se puede obtener momentos más altos, pero estos tres tienden a ser los más útiles y fáciles de entender. Entonces, en lugar de analizar un conjunto 1000x1000 de espectros separados e intentar comprender lo que está sucediendo, solo se requiere observar 2 o 3 imágenes con 1000x1000 píxeles (Cheng 2020, pp. 2-7).

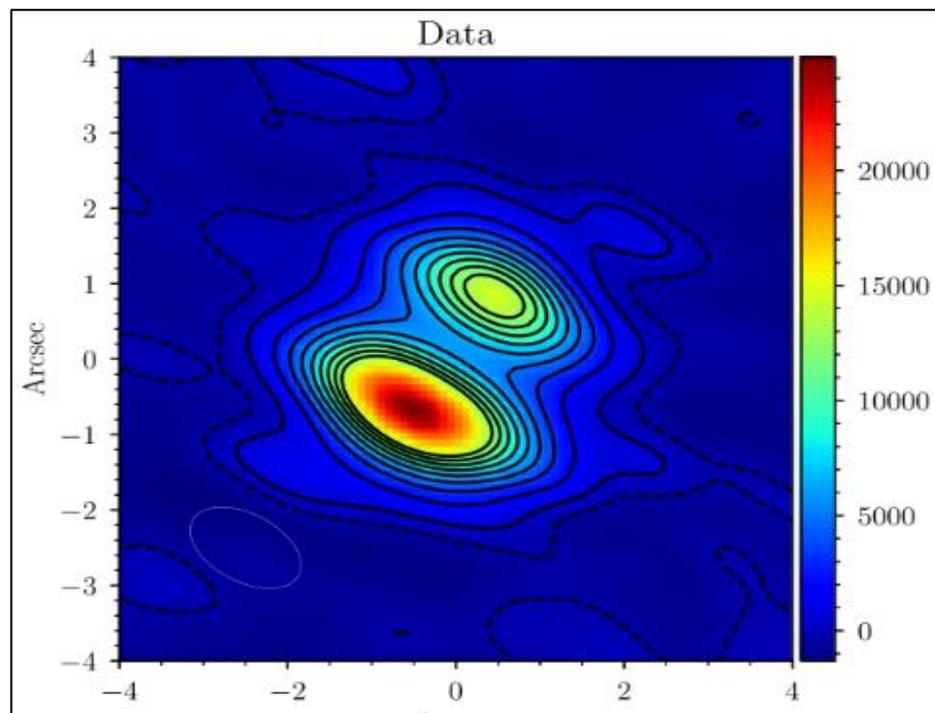


Ilustración 8-2. Representación gráfica de un espectro continuo.

Realizado por: (Cheng 2020, p. 6)

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Enfoque de investigación

El presente trabajo se desarrollará con un enfoque de investigación mixta, dado que se prevé obtener resultados tanto de carácter numérico como resultados cuyo significado físico estará sujeto al análisis que se aplique.

2.2. Nivel de investigación

El nivel de investigación es descriptivo, lo que implica que el propósito del estudio es especificar las propiedades importantes de un fenómeno u objeto; en este caso, las propiedades físicas de la galaxia M100.

2.3. Diseño de investigación

2.3.1. *Según la manipulación o no de la variable*

Este trabajo es de naturaleza no experimental, dado que no se realizará manipulación de alguna variable que condicione los resultados a obtener.

2.3.2. *Según las intervenciones en el trabajo de campo*

Los data cube de una galaxia se construyen (usualmente) a partir de observaciones por largos periodos de tiempo; debido a esto, podemos clasificar el presente trabajo como un estudio longitudinal.

2.4. Tipo de estudio

Tal como se estipula previamente, se va a emplear un data cube de una galaxia, esto significa que no habrá una recolección de datos directa. Esto implica que el tipo de estudio es de carácter documental.

2.5. Población, planificación, selección y cálculo del tamaño de la muestra

A priori, no se requiere de un proceso de recolección de datos dado que se trabajará con el data cube de la galaxia NGC-432, el cual es de libre acceso y compatible con el código de programación del software Python.

2.6. Métodos, técnicas e instrumentos de investigación

A lo largo de esta sección, se enlistará y describirá brevemente cuales fueron los instrumentos y herramientas empleadas en el desarrollo del trabajo, específicamente el software utilizado y qué tipo de tareas se pueden realizar con ellos. De igual manera, se indicará, de forma sistemática, cuáles fueron los procesos que ejecutó el código para poder procesar la información brindada por el data cube y obtener los mapas de momentos, enfatizando en los algoritmos matemáticos involucrados y explicando su relación con la técnica de flujo de hidrógeno.

2.6.1. Herramientas informáticas

2.6.1.1. Jupyter Notebook

Jupyter Notebook se define como un entorno informático de carácter interactivo el cual se basa en la web para generar documentos de Jupyter Notebook. El término "notebook" generalmente se refiere a diversos conceptos, específicamente la aplicación web Jupyter, el servidor web Jupyter Python o el formato de documento Jupyter, dependiendo del contexto. Un documento de Jupyter Notebook es un documento JSON, el cual cumple un esquema versionado y que posee una lista ordenada de celdas de entrada/salida que son capaces de contener código, texto, gráficos y texto enriquecidos (Jupyter Team, 2015). Dentro de este entorno o interfaz informática se ha realizado la ejecución tanto de Anaconda como de Python.

2.6.1.2. Anaconda

Anaconda es una distribución de código abierto de los lenguajes de programación Python y R para la ciencia de datos, que tiene como objetivo simplificar la administración y la implementación de paquetes. Las versiones de paquetes en Anaconda son operadas por el sistema de control de paquetes Conda, que analiza el entorno actual antes de ejecutar una instalación para evitar la interrupción de otros marcos y paquetes.

Anaconda Navigator está incluido en Anaconda y permite a los usuarios iniciar aplicaciones y administrar paquetes, entornos y canales de Conda sin usar comandos de línea de. Navigator

puede buscar paquetes, instalarlos en un entorno, ejecutar los paquetes y actualizarlos. La gran diferencia entre Conda y el administrador de paquetes de Python (Pip) está en cómo se administran las dependencias de los paquetes, lo cual es un desafío importante para la ciencia de datos de Python (Domino, 2022).

2.6.1.3. Python

Python consiste en un lenguaje de programación de elevado nivel, posee una orientación a objetos y semántica de carácter dinámico. Su estructura de datos integradas de elevado nivel, combinado con la escritura dinámica y el enlace dinámico, lo hacen muy atractivo para el desarrollo rápido de aplicaciones y para su uso como lenguaje de secuencias de comandos o enlace para conectar componentes existentes entre sí. Un depurador a nivel de código fuente posibilita la inspección de variables tanto de carácter local como global, el análisis de expresiones arbitrarias, la creación de puntos de interrupción y el paso por el código línea por línea. Usualmente, la forma más rápida de depurar un programa es añadir algunas declaraciones de impresión a la fuente y, gracias al ciclo rápido de edición, prueba y depuración, este proceso es bastante efectivo (Python, 2021).

2.6.1.4. Librerías de Python

De forma general, es importante mencionar que en programación una librería se define como el conjunto de funcionalidades que permiten al usuario realizar nuevas actividades que antes no se podían realizar. Esto significa que las librerías de Python corresponden al conjunto de implementaciones que permiten codificar este lenguaje, con la finalidad de crear una interfaz independiente. Cada una de las librerías de Python poseen diferentes módulos, con funciones específicas y que también difieren en base al sistema operativo que se emplee. Aquellas que fueron utilizadas para el desarrollo del presente trabajo son las siguientes:

- NumPy: es actualmente el paquete principal para la computación científica en Python. Básicamente se define como una biblioteca de Python que suministra un objeto de matriz multidimensional, diversos objetos derivados y una amplia gama de guías para operaciones rápidas en matrices. En el núcleo del paquete NumPy se encuentra el objeto ndarray; este posee matrices n-dimensionales con datos homogéneos y con muchas operaciones que se realizan en código compilado (Numpy Developers, 2022).

- Matplotlib: consiste en una biblioteca multiplataforma que permite visualizar datos y trazado gráfico para Python y su extensión numérica NumPy. En términos generales, ofrece una opción viable de código abierto a MATLAB. Adicionalmente, los desarrolladores pueden utilizar las API (interfaces de programación de aplicaciones) de matplotlib para ingresar gráficos en aplicaciones GUI (Matplotlib, 2022).
- Math: consiste en el módulo matemático de Python, el cual es un componente fundamental dado que fue diseñado para manejar operaciones matemáticas. Entre los principales usos de este módulo se puede mencionar cálculo de combinaciones y permutaciones usando factoriales, cálculo de la desintegración radiactiva mediante la función exponencial, resolver ecuaciones cuadráticas, simulación de funciones periódicas entre otras (Real Python, 2022).

2.6.1.5. Paquetes de Python

Los paquetes se pueden entender como una forma de organizar el espacio de módulos de Python empleando el nombre del módulo y puntos. Por ejemplo, si tenemos el módulo A.B esto implica que estamos trabajando con el paquete A el cual posee un submódulo B. De la misma forma como el utilizar módulos ayuda a los autores de no preocuparse por los nombres de las variables globales de cada uno, el utilizar nombres de módulo con puntos ayuda a los autores de paquetes con diversos módulos, como NumPy o Pillow de no preocuparse por los nombres de los módulos de cada uno (Python Software Foundation, 2022). Los paquetes empleados para el desarrollo de este trabajo son los siguientes:

- Reproject: es un paquete de Python que permite reproyectar imágenes astronómicas empleando diversas técnicas a través de una interfaz uniforme. En este contexto, el término reproyección significa convertir una imagen de un sistema de coordenadas a otro; por ejemplo, cambiar la resolución de píxeles o su orientación. En síntesis, el paquete reproject implementa métodos de reproyección de imágenes (remuestreo) para imágenes astronómicas y, en general, datos n-dimensionales (Robitaille, Deil, Ginsburg, 2022).
- Astropy: es un proyecto para desarrollar un paquete central de astronomía utilizando el lenguaje de programación Python y mejorar la usabilidad, la interoperabilidad y la colaboración entre los paquetes de Astronomía Python. El paquete principal de astronomía contiene funciones destinadas a astrónomos y astrofísicos profesionales, pero puede ser útil para cualquiera que desarrolle software de astronomía. El paquete astropy contiene varias clases, utilidades y un marco de empaquetado destinado a proporcionar herramientas astronómicas de uso común y se divide en varios subpaquetes (Astropy Project, 2022).

- Astroquery: es un conjunto de herramientas para consultar bases de datos y formularios webs astronómicos. Como afiliado de astropy, astroquery requiere la versión 0.4 o posterior de astropy. Únicamente en el ecosistema de Astropy, Astroquery está operando con un modelo de implementación continua, esto significa que un lanzamiento está disponible instantáneamente después de fusionar una solicitud de extracción (The Astroquery Developer, 2022).
- SpectralCube: este paquete proporciona una manera fácil de leer, manipular, analizar y escribir cubos de datos con dos dimensiones posicionales y una dimensión espectral, opcionalmente con parámetros de Stokes. Entre las principales características podemos mencionar una interfaz uniforme para cubos espectrales, resistente a la amplia gama de convenciones de orden de ejes, proyecciones espaciales y unidades espectrales que existen en la naturaleza (Ginsburg et al. 2022).

2.6.2. Metodología del procesamiento de imagen

El presente trabajo se enfocó en la visualización y análisis de un archivo de datos matricial correspondiente a la Galaxia NGC 4321, con conjuntos de datos sobre todas sus longitudes de onda, posición, momentos y velocidades. Esta información fue recopilada de distintos telescopios, como el Spitzer y la muestra SPITSOV, el ultravioleta (GALEX), banda ancha óptica (SDSS y WIYN) y H-alfa (WIYN). y radio continuo (VLA), gracias a la colaboración astronómica de la Universidad de YALE.

2.6.2.1. Técnica del flujo de hidrógeno

De forma sintetizada, la técnica de flujo de hidrógeno es una terminología empleada en el contexto astronómico para referirse a la información que se puede obtener de un cuerpo celeste a partir de la radiación electromagnética del átomo de hidrógeno; sin embargo, esta técnica puede ser replicada para varios elementos, comúnmente el helio y nitrógeno. Tal como se mencionó en apartados anteriores, este elemento, al experimentar un cambio en el estado de energía (de un nivel de distancia) emite radiación con frecuencia de 1.4204 GHz, lo que equivale a una longitud de onda de 21 cm aproximadamente. Aplicando el conocimiento sobre la Ley de Hubble, corrimiento al rojo y el valor referencia mencionado, se puede analizar y deducir ciertas propiedades físicas de los cuerpos relacionadas con su velocidad, temperatura y densidad. Todo este tipo de información fue empleado por los diversos telescopios previamente mencionados para la construcción del data cube de la galaxia NGC 4321.

2.6.2.2. Archivos Fits

El data cube tratado es un archivo de extensión fits (Flexible Image Transport System), un tipo estándar de archivo portátil ampliamente utilizado en la comunidad astronómica para almacenar imágenes y tablas. Para tener un acceso a los datos del archivo fits, se le hizo un tratamiento a través del paquete Astropy de Python, con la extensión astropy.io.fits. Para acceder a la información del fits, se emplea la función `open()` que devuelve un objeto llamado `HDUList` el cual es una colección de objetos `HDU` (Unidad de datos de cabecera). Cada elemento de un `HDUList` es un objeto `HDU` con extensión `.header` y `.data`, atributos que se pueden utilizar para acceder al encabezado.

2.6.2.3. Testeo de datos

Para tener un vistazo general del data cube podemos acceder al fits mediante el comando `hdul.info()` y el comando `print(d)` los cual resume el contenido del archivo FITS abierto:

```
In [3]: file = './ngc4321.cube.fits'
        hdul = fits.open(file)
        h = hdul[0].header
        d = hdul[0].data

In [4]: hdul.info()

Filename: ./ngc4321.cube.fits
No.    Name      Ver   Type      Cards  Dimensions   Format
  0  PRIMARY      1  PrimaryHDU  389    (256, 256, 63, 1) float32
  1  AIPS CC      1  BinTableHDU  19    5000R x 3C   [1E, 1E, 1E]
  2  AIPS CC      2  BinTableHDU  19    5000R x 3C   [1E, 1E, 1E]
  3  AIPS CC      3  BinTableHDU  19    5000R x 3C   [1E, 1E, 1E]
  4  AIPS CC      4  BinTableHDU  19    5000R x 3C   [1E, 1E, 1E]
  5  AIPS CC      5  BinTableHDU  19    5000R x 3C   [1E, 1E, 1E]
  6  AIPS CC      6  BinTableHDU  19    5000R x 3C   [1E, 1E, 1E]
```

Ilustración 9-3. Vista general del data cube.

Realizado por: Autor, 2022

El data cube de la galaxia en estudio posee 63 headers con matrices de información; los valores contenidos en dichas matrices están escritos en notación científica. Una vez realizado este paso, se puede tener una visualización gráfica de los datos mediante la librería de `matplotlib` con la extensión `plt`.

```

In [5]: print(d.shape)
        print(d)

(1, 63, 256, 256)
[[[-2.29961355e-03  5.83682384e-04  2.10959674e-03 ...  5.11241902e-04
   4.03325539e-03  9.51443624e-04]
 [-1.84266223e-03 -3.34445178e-03  6.46941888e-04 ... -2.92933267e-03
  -3.56590230e-04  2.77069048e-03]
 [-9.87683190e-04 -2.83887051e-03 -1.18202064e-03 ... -1.57647103e-03
  -2.92786025e-03 -1.65752589e-03]
 ...
 [ 1.80762564e-03  4.69337392e-04 -1.49351766e-03 ... -9.04703804e-04
  -8.51997102e-05  1.71517453e-03]
 [ 4.15119762e-03  3.25651281e-03  2.53472157e-04 ...  1.71175372e-04
  6.40386948e-04  2.21001892e-03]
 [ 1.82454044e-03  4.04558284e-03  1.88717514e-03 ...  1.64052774e-03
  2.00775149e-03 -1.02919363e-03]]

[[-8.82770808e-04 -8.32799560e-05  6.48105110e-04 ...  7.53737870e-04
  2.07541743e-03  1.29841315e-03]
 [-1.72418426e-03 -1.24598865e-03  3.14154633e-04 ...  3.29314615e-04
  3.10054456e-05 -5.80139458e-04]]

```

Ilustración 10-3. Matrices de información del data cube.

Realizado por: Autor, 2022

2.6.2.4. Ploteo de algunos planos del data cube

Para tener acceso a algunos planos de la galaxia se hace uso del atributo `hdul.data` que, para términos prácticos, se define una matriz de 3x3 en la variable `d_2`, que abarca todos los valores de los headers. A partir de ella, se ajustan algunos arreglos de matrices con un rango corto de 25 valores y se visualizó lo siguiente:

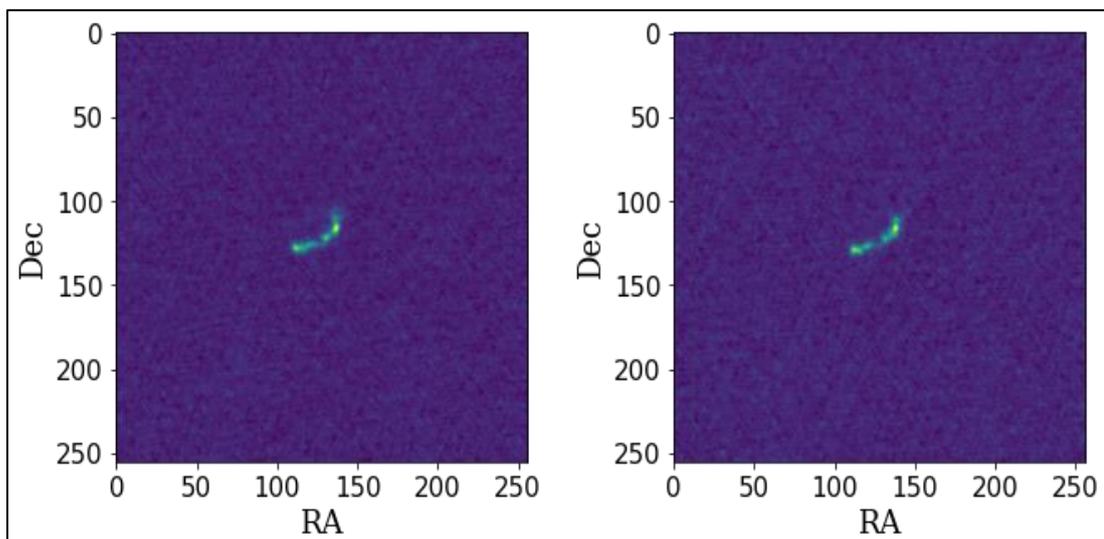


Ilustración 11-3. Planos aleatorios de la galaxia NGC 4321.

Realizado por: Autor, 2022

2.6.2.5. Promedios

Se trabajó con nuestra matriz `d_2` y se hizo uso de la función `np.mean` de Numpy. A continuación, se debe promediar todos los valores a lo largo de un eje especificado, en este caso de `x=0`. Esta herramienta nos brinda una visualización aproximada de nuestra galaxia.

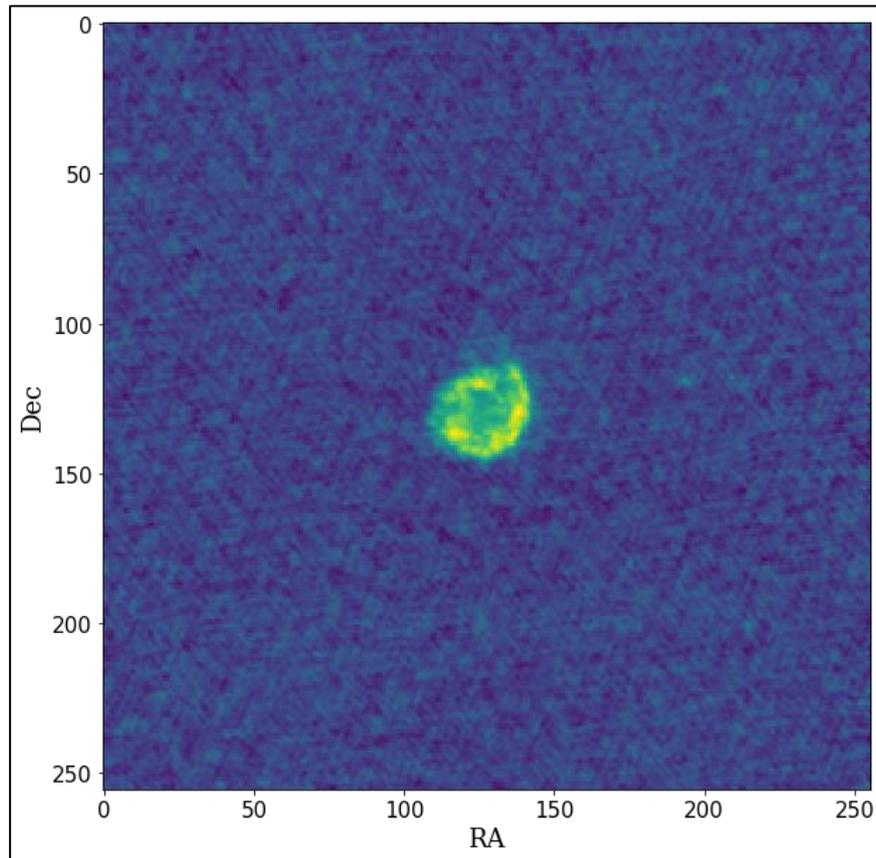


Ilustración 12-3. Imagen preliminar de la galaxia NGC 4321.

Realizado por: Autor, 2022

2.6.2.6. RMS

En radioastronomía, el valor RMS (root mean square) es una abreviatura que significa raíz cuadrada media, es decir, la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de un conjunto de datos. Para calcular el valor RMS se define una función haciendo uso de Numpy. Este valor RMS consiste, en otras palabras, en la desviación estándar a los valores promediados de la variable `d_2` que contiene a la matriz de datos.

```
In [67]: def calc_rms(x):
          rms = np.sqrt(np.mean(x**2))
          return rms

          rms = calc_rms(d_2)
          print(rms)

          0.00060318393
```

Ilustración 13-3. Raíz cuadrada media.

Realizado por: Autor, 2022

2.6.2.7. *Cálculo estimado de la masa*

En base a toda la información procesada y obtenida en los ítems anteriores, se retoma la ecuación 16, la cual permite estimar la masa de hidrógeno presente en la galaxia NGC 4321.

$$\frac{M_H}{M_\odot} \cong (2.36 \times 10^5) \left(\frac{d}{Mpc}\right)^2 \int \left(\frac{S}{Jy}\right) \left(\frac{dv}{kms^{-1}}\right)$$

Se puede apreciar dos términos principales: la distancia que existe entre nosotros y la galaxia en estudio y la integral de la densidad de flujo espectral sobre el diferencial de velocidad de recesión. En primer lugar, se procesó la información sobre la línea espectral del hidrógeno en busca de valores de frecuencia que difieran de 1.4202 GHz; frecuencia referencial que es emitida por este elemento cuando se presenta un cambio en el estado de energía de sus átomos. A partir de esta información, y en base a la ecuación 6, se obtuvo el rango de valores de corrimiento al rojo (o azul) de la galaxia. Luego, aplicando la ecuación 8, se utilizaron dichos valores para generar el rango de velocidades de recesión. De forma paralela, el código determinó que el data cube contaba con valores de densidad de flujo (S) asociados a cada una de las velocidades de recesión encontradas, generando una gráfica de Jansky (en el eje y) contra km/s (en el eje x). Retomando la ecuación 16, y empleando la gráfica mencionada, se dedujo el valor del segundo término (integral de la densidad de flujo espectral sobre el diferencial de velocidad de recesión) dado que corresponde al área bajo la curva del dicho gráfico. Posteriormente, se elevó al cuadrado la distancia de la galaxia NGC 4321 respecto a nosotros. A pesar de que dicha distancia pudo ser obtenida mediante la ecuación 7, relacionando la velocidad de recesión promedio con la constante de Hubble, el código utilizó un valor de 16 Mpc dado que se considera un valor estándar para la mayoría de galaxias dentro del cúmulo de Virgo. Multiplicando los dos términos obtenidos por 2.36×10^5 , se consiguió la cantidad aproximada de hidrógeno en la galaxia (en masas solares).

2.6.2.8. *Momento 0*

El data cube posee headers con información que ayuda a crear los mapas de momento a partir de los datos de radiofrecuencia, ascensión, declinación y desplazamiento angular, acorde a los ejes. Para el Momento 0, es necesario guardar los datos de los headers CDEL1, CTYPE1, CRVAL1, CRPIX1, CDEL2, CTYPE2, CRVAL2, CRPIX2, en un nuevo archivo fits, denominado mom.0.fits. Este nuevo data cube tiene los atributos h_mom0 y d_mom0. Una vez creados, se usó skyview para crear las variables d_opt y h_opt y plotamos alrededor del eje y (declinación) y x (ascensión recta).

Este mapa de momento expuso información sobre la distribución del hidrogeno a lo largo de la galaxia y su relación con el potencial gravitacional. Es importante recalcar que la masa depende del radio interno de la galaxia y, a la par, el radio interno depende del ángulo, por ende, el código tuvo que realizar una ecuación que incluya la densidad en función del radio interno y que dicho radio esté en función del ángulo θ evaluado hasta 2π .

2.6.2.9. *Momento 1*

Para crear el momento 1, se definió una nueva variable mom1 a partir de los valores de este subcube, pero de orden 1. Este ploteo tiene el mismo rango de valores que el momento 2, así que, por términos prácticos, es solo una extensión del mismo archivo fits. El objetivo de dibujar el mapa de momentos 1 a partir de los datos del momento 0 es crear una máscara o filtro para graficar solo los píxeles que tienen una emisión HI significativa basada en el mapa del momento 0. Para crear la máscara, se define un pequeño arreglo de los datos del momento 0, para establecer la cantidad de ruido presente en parámetros menores o mayores a 0.5 de emisión. Finalmente, el gráfico del momento 1 (limpio) se obtuvo al crear un arreglo del mismo momento 1 multiplicado por el arreglo de la máscara.

Este mapa expuso información sobre la velocidad del gas de hidrógeno a lo largo de la galaxia, lo cual brinda información respecto al estado de rotación de la misma; debido a que se emplea un bloque de información diferente, los valores para la velocidad de recesión varían respecto a los empleados en el cálculo de la masa de hidrógeno

2.6.2.10. *Momento 2*

Para el momento 2, se hizo uso de SpectralCube, el cual permite leer, manipular, analizar y escribir cubos de datos con dos dimensiones posicionales y una dimensión espectral. Primero, se creó una variable cube de lectura del archivo fits original, que establece el rango espectral de los datos y una variable subcube que recoge valores de entrada de los límites inferior y superior en la región, en este caso de velocidad (m/s) e irradiancia. Después, se definió una nueva variable mom0 a partir de la variable subcube de orden 0, que crea una especie de archivo fits, con su mom0.header y mom0.data. Finalmente, mediante la función sobre escritura del archivo fits del momento 0, se creó un nuevo archivo fits, específicamente para el momento 2 que permitió graficar el mapa de momentos 2. El tercer mapa proporcionó información sobre la intensidad de radiación en función de la frecuencia, lo cual se puede interpretar como radiancia espectral. Esta imagen es particularmente interesante dado que nos permite deducir información sobre la temperatura de la galaxia, específicamente sobre la temperatura de brillo, descrita por la ecuación 17. Se ingresan los datos que aporta el mapa en la ecuación mencionada (en unidades de $Wm^{-2}Hz^{-1}$) y, con ello, se puede obtener valores aproximados de la temperatura de brillo en diferentes secciones de la galaxia.

CAPÍTULO III

3. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se expondrá la información relevante, tanto cuantitativa como cualitativa, de la galaxia NCG 4321 que se obtuvo mediante el procesamiento de su data cube basado en la técnica del flujo de hidrógeno; de igual manera, se discutirá el significado físico de esta información tratando de enfocarse en los objetivos de investigación planteados. Finalmente, en caso de ser posible, se empearán los resultados primarios en la obtención de nuevos datos.

3.1. Velocidad de recesión y masa

Tal como se planteó en la sección metodológica, la técnica de flujo de hidrógeno consiste en el conjunto de procesos y cálculos aplicados a un data cube con la finalidad de obtener valores sobre algunas propiedades físicas de la galaxia y usar dichos valores para deducir la cantidad de hidrógeno que la compone (en masas solares) mediante la ecuación 16:

$$\frac{M_H}{M_\odot} \cong (2.36 \times 10^5) \left(\frac{d}{Mpc} \right)^2 \int \left(\frac{S}{Jy} \right) \left(\frac{dv}{kms^{-1}} \right)$$

La primera parte del procesamiento arrojó un rango de velocidad de recesión de la galaxia, y asoció a cada velocidad dentro de ese rango un valor de densidad de flujo espectral S , generando el siguiente gráfico:

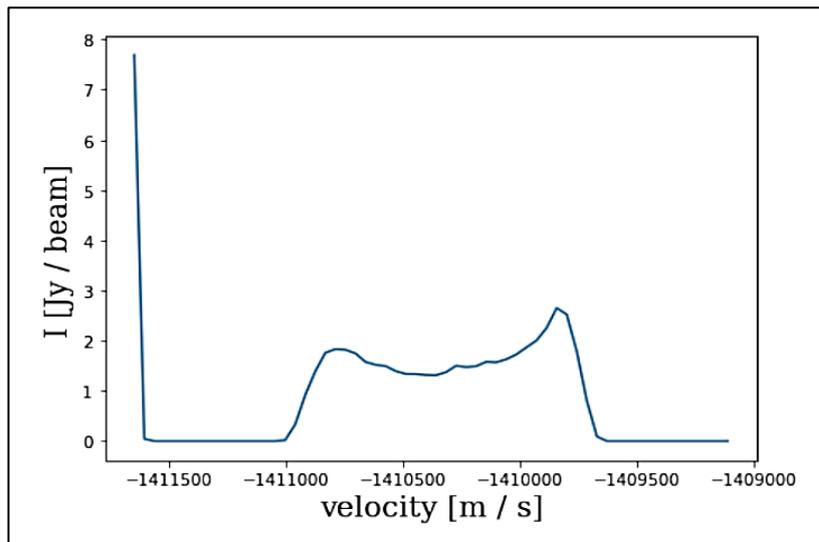


Ilustración 14-4. Densidad de flujo en función de la velocidad.

Realizado por: Autor, 2022

Se puede apreciar que los valores de velocidad de recesión de la galaxia varían aproximadamente entre $[-1411.00 \text{ hasta } -1409.70] \text{ km/s}$. Es importante remarcar que el signo menos en el valor de velocidad representa que la galaxia se está acercando a nosotros, lo cual indica que, si se observa la frecuencia emitida, se debe percibir un valor de corrimiento al azul aproximado de -0.0047 . Al calcular el promedio para la velocidad de recesión (1410.35 km/s) y aplicando la ley de Hubble (ecuación 7) con un valor estándar de 73 km/sMpc para la constante de Hubble, se obtiene una distancia aproximada de 19.32 Mpc . Con la finalidad de realizar una comparación, se puede aplicar el mismo proceso empleando valores disponibles en la base de datos galácticos de la NASA/IPAC. Una medición basada igualmente en la línea espectral del hidrógeno dio como resultado una distancia promedio de 16.21 Mpc empleando un valor de 72.8 km/sMpc para la constante de Hubble, lo cual equivale a una velocidad de recesión aproximada de 1180.08 km/s (NED, 2022). Al comparar con los datos obtenidos en este trabajo, se aprecia una diferencia del 19.52% en la velocidad y del 19.19% en la distancia. Estos valores de variación son usuales en el contexto de estudio astronómico, además, al revisar otras medidas dentro de la misma base de datos, se puede encontrar valores mucho más cercanos a los obtenidos en esta investigación. Respecto al valor de masa (retomando la ecuación 16) es importante aclarar que el código empleó un valor de 16 Mpc dado que se considera un valor de distancia estándar para la mayoría de las galaxias pertenecientes al cúmulo de Virgo. Luego, integró la densidad de flujo en función del diferencial de velocidad dando como resultado 715.03 , que equivale al área bajo la curva descrita en la ilustración 14-4. Tras resolver la ecuación 21, se obtuvo un valor de $4.3199 \times 10^{10} M_{\odot}$; este valor corresponde a la cantidad de hidrógeno presente en la galaxia más no a su masa total.

3.2. Mapa de momento 0

Tras obtener el valor de la masa de hidrógeno en la galaxia, el mapa de momento 0 indica la distribución de dicha masa (también conocido en radiometría como densidad de columna). Tal como se aprecia en la ilustración 15-5, la información que se puede extraer del mapa es de carácter cualitativo y relaciona, mediante una escala de color, la concentración de masa en diferentes zonas de la galaxia. Tal como era de esperarse en función de la estructura de una galaxia espiral, el núcleo galáctico presenta la mayor concentración de hidrógeno y esta concentración disminuye a medida que nos alejamos del centro. Las líneas azules que se visualizan delimitan la superficie del disco galáctico siendo la de color más oscuro la que contiene a la totalidad del disco de hidrogeno neutro caliente (HI disk).

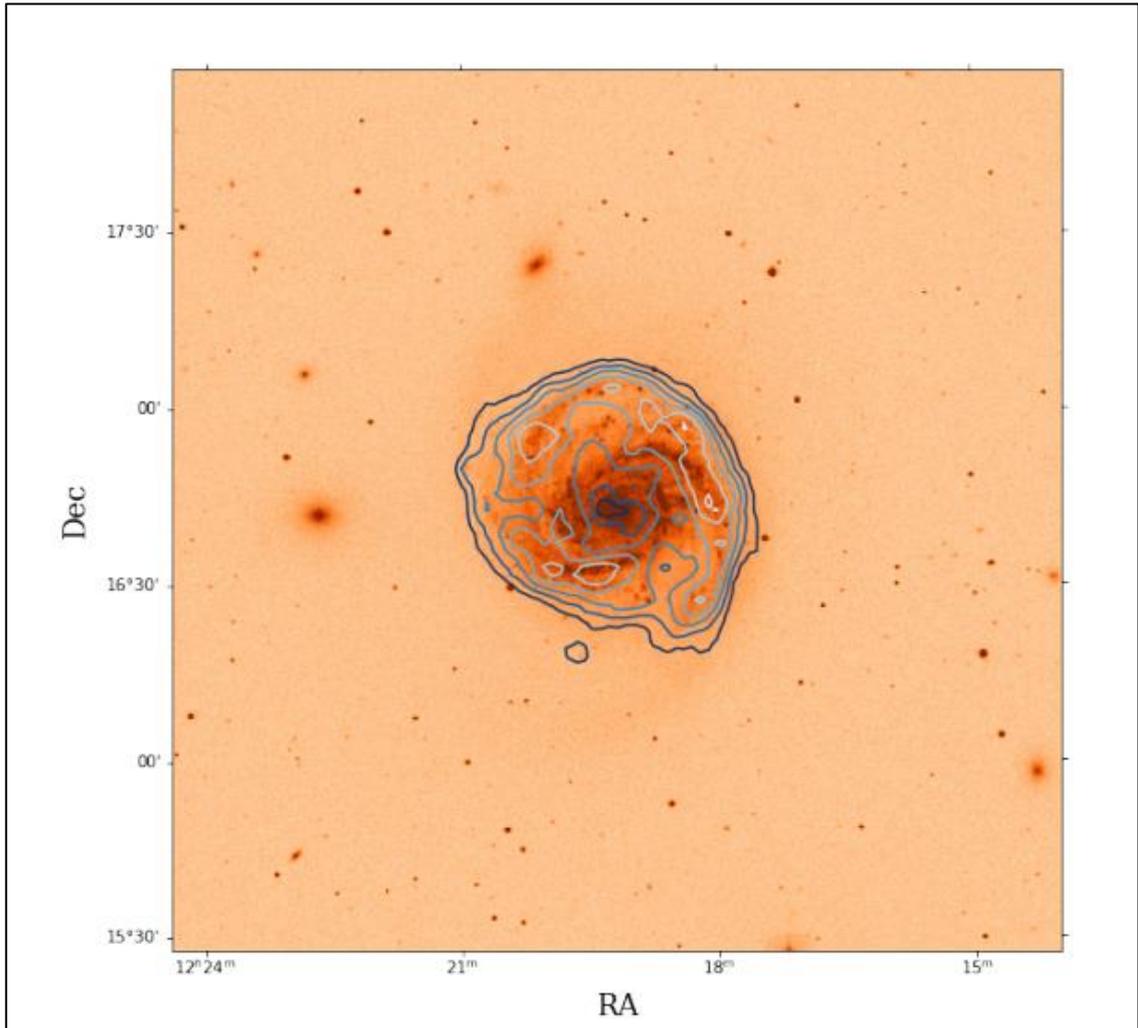


Ilustración 15-4. Mapa de momento 0

Realizado por: Autor, 2022

3.3. Mapa de momento 1

Este mapa plantea un rango para la velocidad de recesión que difiere respecto a los valores empleados anteriormente en el cálculo de la masa (ecuación 16). Sugiere que la galaxia se acerca a la Vía Láctea en un intervalo de velocidad de [1600 hasta 2100] km/s . Realizando el mismo procedimiento aplicado en la sección 4.1, se obtuvo un valor promedio para velocidad de recesión de $1850 km/s$. Al ingresar a la base de datos galácticos de la NASA/IPAC se puede apreciar que los valores de velocidad empleados por este mapa de momento son bastante similares a las mediciones de la velocidad respecto a la Radiación de Fondo de Microondas ($1896 km/s$).

Es importante recalcar que estas mediciones emplearon un valor de 67.8 km/sMpc para la constante de Hubble, obteniendo una distancia aproximada de 27.96 Mpc (NED, 2022). Al considerar la velocidad obtenida en este mapa, la distancia toma un valor de 27.29 Mpc . Esto implica que al comparar los valores de NASA/IPAC con los provistos por el data cube en esta sección, la diferencia es de tan solo 2.48% para la velocidad y 2.45% para la distancia, porcentajes significativamente menores frente a los obtenidos en la sección 4.1. Esto puede sugerir que los datos recopilados en esta sección del data cube fueron obtenidos en función de la Radiación de Fondo de Microondas.

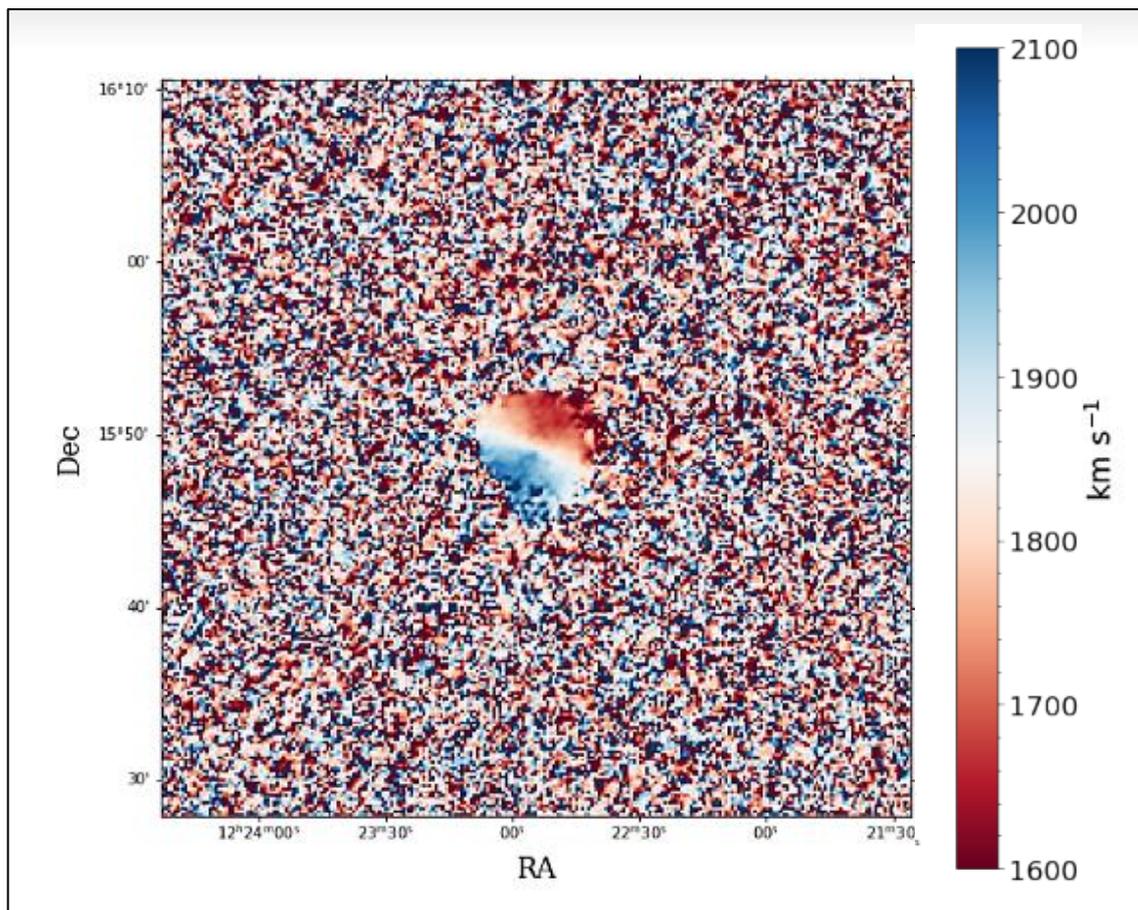


Ilustración 16-4. Mapa de momento 1.

Realizado por: Autor, 2022

Esta imagen cuenta con demasiado ruido debido a que se incluyen los píxeles que no tienen emisión HI de la galaxia. Para mejorar el aspecto del gráfico, se creó una máscara o filtro para los datos, de modo que solo se representen los píxeles que poseen una emisión de HI significativa según el mapa del momento 0.

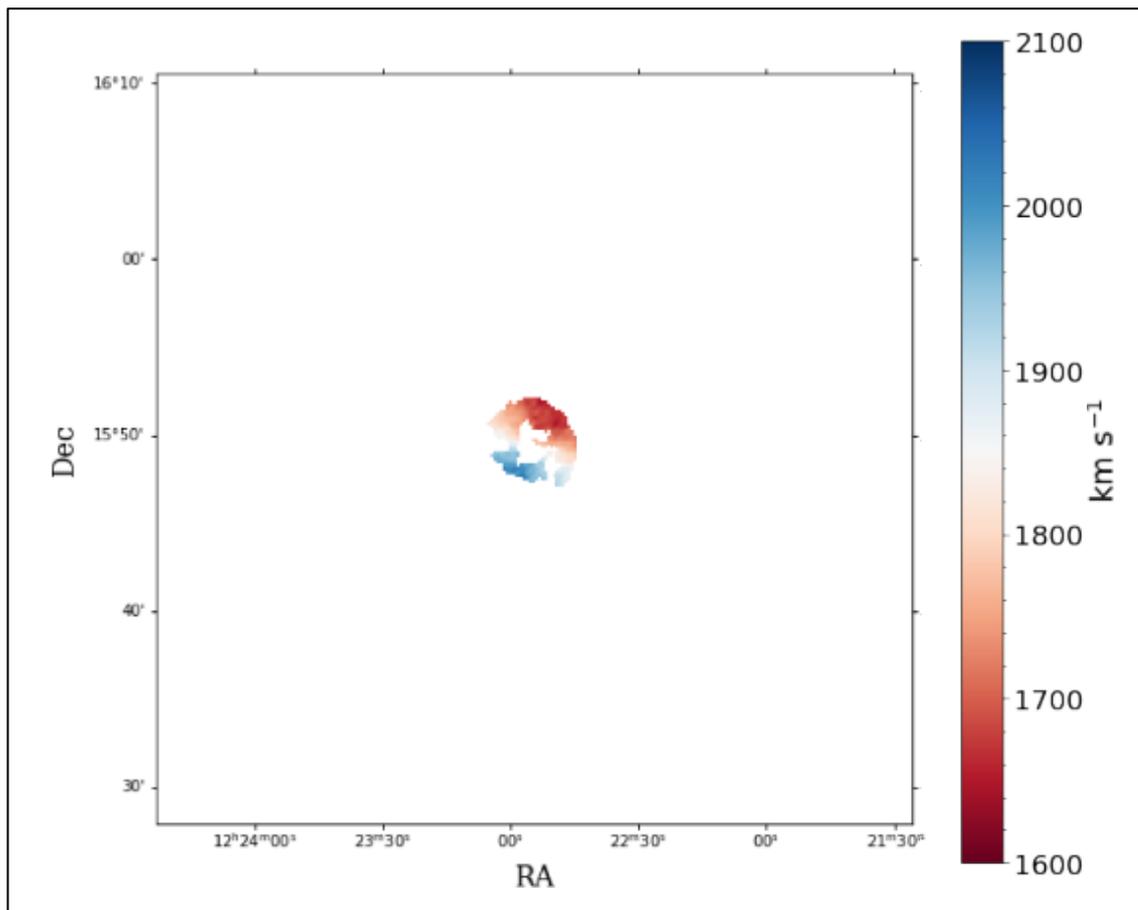


Ilustración 17-4. Mapa de momento 1 (sin ruido).

Realizado por: Autor, 2022

Se puede analizar estas dos últimas imágenes en función a lo expuesto previamente en la presente sección. Se conoce que la velocidad de recesión promedio es de 1850 km/s , valor que se denota de color blanco en las imágenes. Considerando que este momento debe aportar información sobre el estado de rotación de la galaxia, es posible visualizar que dicha rotación ocurre sobre un eje diagonal que coincide con la región delgada de color blanco representada claramente en la ilustración 16-4. Al considerar que 1850 km/s es el valor de velocidad de recesión macroscópico, se infiere que existen regiones de la galaxia que presentan una velocidad de dispersión de $\pm 250 \text{ km/s}$. En base a esto, se puede afirmar que la región sur de la galaxia (mayoritariamente azul) rota en dirección al observador mientras que la región norte (mayoritariamente roja) se aleja del observador. Las imágenes del mapa refuerzan esta idea dado que, justo en los extremos inferior y superior se presentan los valores pico de velocidad, mientras que, al acercarse al centro, dicho valor disminuye. Esto es muy evidente en la ilustración 16-4 donde la región en blanco correspondería al eje de rotación. En la ilustración 17-4, el proceso de reducción de ruido ha eliminado parte de la información importante, sin embargo, también se puede apreciar el fenómeno de rotación.

3.4. Mapa de momento 2

Se conoce que, en base a la naturaleza de los datos presentes en el data cube procesado, el momento 2 puede dar información sobre la dispersión de velocidades en la galaxia o sobre su temperatura. En este caso, las unidades son de radiancia espectral, por lo cual se deduce que el enfoque de la imagen es la temperatura.

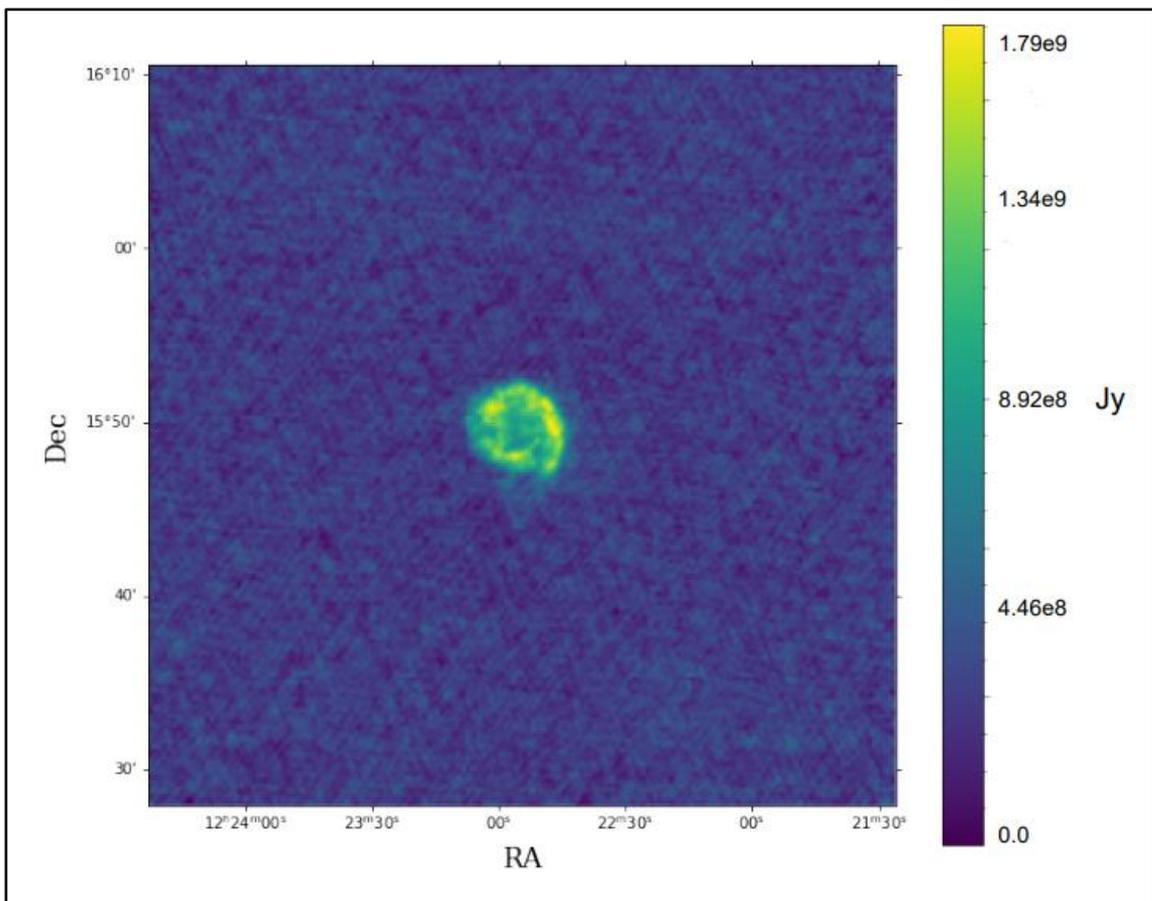


Ilustración 18-4. Mapa de momento 2.

Realizado por: Autor, 2022

En base a lo expuesto en la sección metodológica, se conoce que los valores de irradiación espectral se deben ingresar en la ecuación 17 y con ello se obtiene información sobre la temperatura de brillo de la galaxia. Si se desea aplicar este proceso al mapa de momento 2, se puede empezar por discriminar todos los valores por debajo de $8.92 \times 10^8 Jy$ dado que casi ningún píxel en la imagen posee un $Jy < 8.92 \times 10^8$. Considerando esto, el valor promedio de irradiación espectral ronda los $1.34 \times 10^9 Jy$. Es importante transformar las unidades a $Wm^{-2}Hz^{-1}$.

$$1.34 \times 10^9 Jy = (1.34 \times 10^9)(10^{-26}) \left(\frac{W}{m^2 Hz} \right)$$

$$1.34 \times 10^9 Jy = 1.34 \times 10^{-17} \left(\frac{W}{m^2 Hz} \right)$$

Posteriormente, se aplica la ecuación de temperatura de brillo. Es importante recordar que f_o hace referencia a la frecuencia en reposo emitida por un elemento, en este caso, el hidrógeno tomando un valor de $1.4204 \times 10^9 Hz$.

$$T_b = \frac{\lambda^2 L_f}{2k}$$

$$T_b = \frac{(0.21 m)^2 (1.34 \times 10^{-17} Wm^{-2} Hz^{-1})}{2 (1.3806 \times 10^{-23} J/K)}$$

$$T_b = 21\,401.56 K$$

La temperatura de brillo de la galaxia, para un valor promedio de irradiancia espectral de $1.34 \times 10^9 Jy$ es de $21\,401.56 K$. Considerando que la mayor parte de la información presente en la ilustración 18-4 corresponde al disco galáctico, se puede comparar este valor con otras temperaturas de discos galácticos, tal sea el caso de la Vía Láctea, cuyo disco posee una temperatura que fluctúa entre los 10 a 18 mil grados kelvin (Cheng 2020, pp. 2-7).

CONCLUSIONES

La revisión bibliográfica evidenció la robustez de la información disponible, la cual permitió sustentar los fundamentos teóricos y metodológicos empleados en el desarrollo del presente trabajo

El lenguaje de programación Python, en conjunto con sus librerías y paquetes astronómicos, ejecutado a través del entorno informático de Jupyter Notebook, mostró ser eficiente para el procesamiento de los bloques informáticos del data cube de la galaxia NGC 4321.

La metodología, basada en la técnica de flujo de hidrógeno, permitió encontrar información sobre la masa, velocidad de recesión y temperatura de la galaxia NGC 4321; cuyos valores promedio fueron: $4.3199 \times 10^{10} M_{\odot}$; 1410.35 y 1850 *km/s*; 21401.56 *K* respectivamente.

El mapa de momento 0 mostró, de manera descriptiva, la distribución de la masa de la galaxia NGC 4321; mientras que en el mapa de momento 1 se dedujo la rotación de la galaxia a partir de su velocidad de recesión y en el mapa de momento 2 se visualizó la radiación espectral.

El eje de rotación de la galaxia NGC 4321 es paralelo al plano de visión terrestre, siendo la región sur aquella que rota en dirección a nosotros y la región norte la que se aleja; esto ocurre con un rango de velocidad de ± 250 *km/s*.

RECOMENDACIONES

Con la finalidad de robustecer la información obtenida en este trabajo, se recomienda aplicar la metodología basada en la línea espectral de otros elementos aparte del hidrógeno, y comparar resultados.

Con el objetivo de mejorar la resolución de las imágenes, se recomienda utilizar un computador con mejores características de procesamiento.

BIBLIOGRAFÍA

ALZATE LÓPEZ, Héctor, 2006. *Física de las Ondas*. 1. Medellín: Universidad de Antioquia.

AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS, 2022. *Right Ascension and Declination*. 2022. American Institute of Physics.

ASTROPY PROJECT, 2022. Astropy. *Astropy project*. Online. 9 noviembre 2022. [Consultado 17 octubre 2022]. Recuperado a partir de: <https://www.astropy.org/about.html>

CHENG, C., 2020. ALMA 205 μ m Imaging Spectroscopy of the Lensed Submillimeter Galaxy ID 141 at Redshift 4.24. *The Astrophysical Journal*. 2020. Vol. 898, pp. 2–7.

CHOUDHURI, A., 2010. *Astrophysics for Physicists*. 1. Nueva York: Cambridge University Press.

DOMINO, 2022. Anaconda. *Domino Data Lab*. 2022.

FREEDMAN, Roger y KAUFMANN III, William., 2008. *Universe*. 8. New York: W.H. Freedman and Company.

FURTADO, P. y MEDEIRA, H., 2000. *Data Warehousing and Knowledge Discovery* 200. 2. Berlín: Springer.

GINSBURG, Adam, **ROBITAILLE**, Tom, **BEAUMONT**, Chris, **LEROY**, Adam, **ROSOLOWSKY**, Erick y **KOCH**, Eric, 2022. Spectral Cube documentation. *Spectral cube*. Online. 2022. [Consultado 4 noviembre 2022]. Recuperado a partir de: <https://spectral-cube.readthedocs.io/en/latest/>

HEWITT, Paul, 2007. *Física Conceptual*. 10. México: Pearson Education.

JUPYTER TEAM, 2015. Jupyter Notebook. *Jupyter Team*. Online. 16 octubre 2015. [Consultado 15 octubre 2022]. Recuperado a partir de: <https://jupyter-notebook.readthedocs.io/en/stable/>

KALINOVA, V., COLOMBO, D., SÁNCHEZ, S. F., ROSOŁOWSKY, E., KODAIRA, K., GARCÍA-BENITO, R., MEIDT, S. E., DAVIS, T. A., ROMEO, A. B., YU, S-Y., GONZÁLEZ DELGADO, R. y LACERDA, E. A. D., 2022. Investigating the link between inner gravitational potential and star-formation quenching in CALIFA galaxies. *Astronomy & Astrophysics*. 7 julio 2022. Vol. 665, no. A90, pp. 1–14.

KARTTUNEN, H., KRÖGER, P., OJA, H., POUTANEN, M. y DONNER, K. J., 2007. *Fundamental Astronomy*. 5. Nueva York: Springer.

LINARES HURTADO, J. y MORATILLA SORIA, B., 2007. *El hidrógeno y la energía*. 1. Madrid: Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI.

MATPLOTLIB, 2022. Matplotlib: Visualization with Python. *The Matplotlib development team*. Online. 2022. [Consultado 12 octubre 2022]. Recuperado a partir de: <https://matplotlib.org/>

NED, 2022. NASA/IPAC EXTRAGALACTIC DATABASE. *Results for object Messier 100*. junio 2022.

NEMIROFF, Robert y BONNELL, Jerry, 2018. Astronomy Picture of the Day. *M100: A Grand Design Spiral Galaxy*. Online. 25 diciembre 2018. [Consultado 16 octubre 2022]. Recuperado a partir de: <https://apod.nasa.gov/apod/ap181225.html>

NUMPY DEVELOPERS, 2022. NumPy. *NumPy Developers*. Online. 17 octubre 2022. [Consultado 16 octubre 2022]. Recuperado a partir de: <https://numpy.org/doc/stable/user/whatisnumpy.html>

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2022. El tutorial de Python. 6. Módulos. *Python Software Foundation*. Online. 2022. [Consultado 16 octubre 2022]. Recuperado a partir de: <https://docs.python.org/es/3/tutorial/modules.html#packages>

PYTHON, 2021. What is Python? Executive Summary. *Python.org* . 2021.

REAL PHYTON, 2022. The Python math Module: Everything You Need to Know. *Real Phyton*. Online. 2022. [Consultado 16 octubre 2022]. Recuperado a partir de: <https://realpython.com/python-math-module/>

ROBITAILLE, Thomas, DEIL, Christoph y GINSBURG, Adam, 2022. Reproject:doc. *Reprojects*. Online. 18 octubre 2022. [Consultado 12 noviembre 2022]. Recuperado a partir de: <https://reproject.readthedocs.io/en/stable/>

SALINAS, J. Z., SCHAEERER, C. E., LEGAL, H. y GARCÍA-TORRES, M., 2016. Procesamiento de Imágenes y Extracción de Características Morfológicas para Clasificación de Galaxias. En: CCIS (ed.), *Conference of Computational Interdisciplinary Science. CCIS 2016*. Sao Jose dos Campos: CCIS. 2016.

SÁNCHEZ GIL, Carmen, 2011. *Kinematics and Star Formation in a sample of Nearby Galaxies*. Granada: Universidad de Granada.

SHU, Frank, 1982. *An Introduction to Astronomy*. 1. California: University Science Books.

THE ASTROQUERY DEVELOPER, 2022. Astroquery:doc. *The Astroquery Developers*. Online. 11 octubre 2022. [Consultado 20 octubre 2022]. Recuperado a partir de: <https://astroquery.readthedocs.io/en/latest/>

TROCCOLI, Osvaldo, 1973. *Estudio de líneas espectrales usadas en espectroscopía analítica*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.

VALERDI NEGREROS, MAYRA MABEL, 2013. *Evolución de Galaxias en Cúmulos*. Online. Puebla: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. [Consultado 12 noviembre 2022]. Recuperado a partir de: <https://www.fcfm.buap.mx/assets/docs/docencia/tesis/fisica/2013/ValerdiNegrerosMayraMabel.pdf>

ANEXOS

ANEXO A: ANÁLISIS DEL DATA CUBE TRIDIMENSIONAL

1 Working with a 3D data cube (Astrophysics)

requirements: astropy, numpy, matplotlib

contents: - reading in fits data cubes (3D spectral line data - HI data of a galaxy) - plotting slices of the 3D data cube - downloading astronomical images from a database (for the same galaxy as the HI data) - making an overlay of the HI data onto an optical image - Plotting the HI spectra of a galaxy - calculating the HI mass of a galaxy - making moment maps

1.1 Resources

- Google is your best friend. If you have coding questions, it is likely that someone also had the same question before and there are answers online.
- The documentation of the different python packages, e.g. matplotlib, numpy, astropy is good. You can find a lot of useful information there.
- stackoverflow is a website where people can ask questions of the community. There are generally good solutions there to problems.
- The astropy website has several tutorials and examples that can help you to learn how to do plots and calculations with the package: <https://learn.astropy.org/>
- There are also several other websites with various free python tutorials
- A collection of lecture notes on Radio astronomy: <https://science.nrao.edu/opportunities/courses/era>
This is a very good resource to learn more about radio astronomy
- usefull information on the spectral lines in general: <https://www.cv.nrao.edu/~sransom/web/Ch7.html#E15!>
This has all the relevant equations

```
[8]: import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

from astropy.io import fits
from astropy import units as u
from astropy.coordinates import SkyCoord
from astropy.wcs import WCS

from reproject import reproject_interp

from astroquery.skyview import SkyView
from astroquery.vizier import Vizier

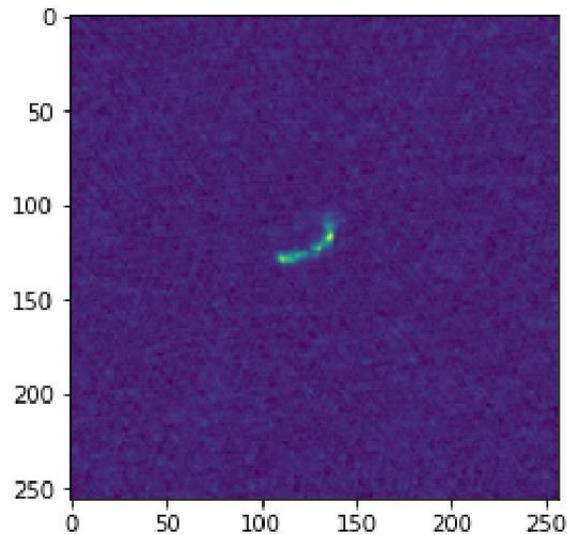
from spectral_cube import SpectralCube
```

```
/home/daniel/anaconda3/lib/python3.7/site-packages/secretstorage/dhcrypto.py:16:
CryptographyDeprecationWarning: int_from_bytes is deprecated, use int.from_bytes
instead
```

```
    from cryptography.utils import int_from_bytes
/home/daniel/anaconda3/lib/python3.7/site-packages/secretstorage/util.py:25:
CryptographyDeprecationWarning: int_from_bytes is deprecated, use int.from_bytes
instead
    from cryptography.utils import int_from_bytes
```

```
[9]: ! pip install reproject
! pip install astroquery
! pip install spectral_cube
```

ANEXO B: PLOTEO Y OBTENCIÓN DE VALORES MEDIOS



1.4.1 Plot several slices of the data in one figure

- use subplots in matplotlib

```
[17]: fig = plt.figure(figsize=(11,10))

for j,i in enumerate(range(25,29), start=1):
    ax = fig.add_subplot(2,2,j)
    plt.imshow(d_2[i,:,:])
    ax.set_xlabel('RA', size=18, family='serif')
    ax.set_ylabel('Dec', size=18, family='serif')
    #plt.xlim([0,9])
    #plt.ylim([0,9])
    plt.xticks(fontsize=15)
    plt.yticks(fontsize=15)

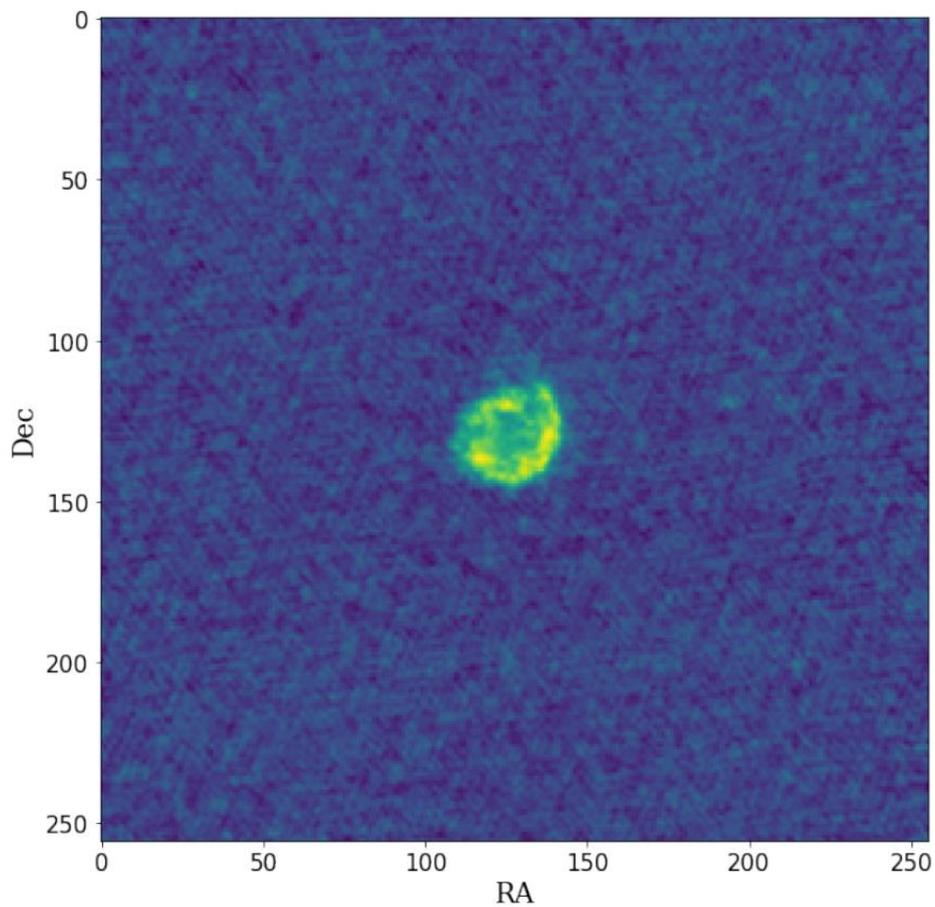
plt.savefig('ngc4192_test.png')#guardar una imagen
```

```
[18]: ### Plot one spatial axis and the frequency axis
```

```
[19]: fig = plt.figure(figsize=(11,10))

ax = fig.add_subplot(1,1,1)
plt.imshow(d_2[:,125,:])
ax.set_xlabel('Channel/frequency', size=18, family='serif')
ax.set_ylabel('Dec', size=18, family='serif')
plt.xticks(fontsize=15)
plt.yticks(fontsize=15)

plt.savefig('ngc4192_test_2.png')
```

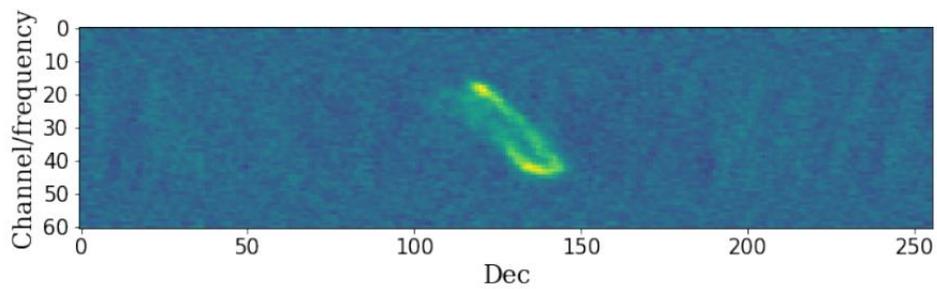


```
[21]: fig = plt.figure(figsize=(11,10))

d_2_av = np.mean(d_2, axis=2) # axis 2 is the RA

ax = fig.add_subplot(1,1,1)
plt.imshow(d_2_av[:-2,:])
ax.set_xlabel('Dec', size=18, family='serif')
ax.set_ylabel('Channel/frequency', size=18, family='serif')
plt.xticks(fontsize=15)
plt.yticks(fontsize=15)

plt.savefig('ngc4192_pv.png')
```

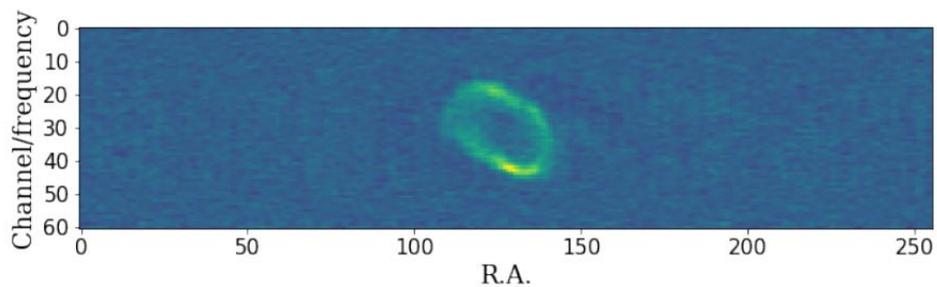


```
[22]: fig = plt.figure(figsize=(11,10))

d_2_av = np.mean(d_2, axis=1) # axis 1 is the declination

ax = fig.add_subplot(1,1,1)
plt.imshow(d_2_av[:60,:])
ax.set_xlabel('R.A.', size=18, family='serif')
ax.set_ylabel('Channel/frequency', size=18, family='serif')
plt.xticks(fontsize=15)
plt.yticks(fontsize=15)

plt.savefig('ngc4192_pv_2.png')
```



1.6 Mask the cube

Mask the noisy pixels, i.e. pixels with signal to noise less than 3

1.6.1 Calculate the rms of the data

This can be used for a threshold. For example 5 sigma is usually a good lower threshold for detection

```
[23]: def calc_rms(x):  
      rms = np.sqrt(np.mean(x**2))  
      return rms  
  
      rms = calc_rms(d_2)  
      print(rms)
```

0.00060318393

```
[24]: d_2[d_2 < 5*rms] = 0  
      print(d_2.shape)
```

(63, 256, 256)

```
[25]: fig = plt.figure(figsize=(11,10))  
  
      d_2_mom0 = np.sum(d_2, axis=0)* abs(h['CDELTA3'])/1000  
  
      # this is the 0 orderd moment of the data also called moment 0  
  
      ax = fig.add_subplot(1,1,1)  
      plt.imshow(d_2_mom0)  
      ax.set_xlabel('RA', size=18,family='serif')  
      ax.set_ylabel('Dec', size=18,family='serif')  
      plt.xticks(fontsize=15)  
      plt.yticks(fontsize=15)  
  
      plt.savefig('ngc4192_test_3sig.png')
```

ANEXO C: DETECCIÓN DEL VALOR MEDIO

```
ax.set_xlabel('velocity [m / s]', size=18, family='serif')
ax.set_ylabel('I [Jy / beam]', size=18, family='serif')
plt.savefig('Espectro de velocidad ngc4321.png')
```

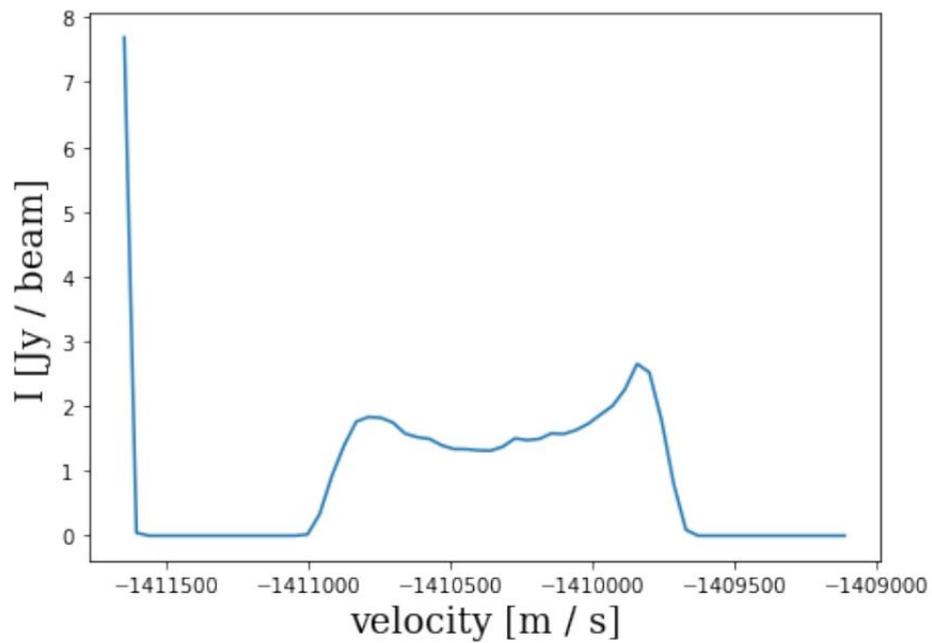
(63, 256)

3rd axis type FREQ

3rd axis steps 43015.25

3rd axis type 1411648996.89

data units JY/BEAM



1.11 Calculate the HI mass of the galaxy

A good information source on galaxies is the NASA/IPAC Extragalactic Data Base (NED): <https://ned.ipac.caltech.edu/>

If you search the galaxy NGC 4192, you will find various information on it, including: coordinates, optical magnitudes, optical diameter, distance measurements, optical velocity measurement, other names, morphological identification etc.

This is an extragalactic data base, so you can also search other catalogued galaxies in this data base.

ANEXO D: DISTANCIA Y MASA DE LA GALAXIA

```
[59]: spectra_2 = spectra[spectra > 0]
      vel_ext = (abs(h['CDELTA3'])) / 1000 * len(spectra_2) # calculate the velocity
      ↪ extent of the spectra
      chan_width = abs(h['CDELTA3']) / 1000

      beam_px = (np.pi * (18.26/3600/h['CDELTA2']) * (16.03/3600/h['CDELTA2'])) / (4 *
      ↪ np.log(2)) # beam size in pixels

      S_int = np.sum(spectra[:-3] * chan_width / beam_px) # integrate the spectra in
      ↪ km/s, final unit needs to be in Jy
      print(S_int)
```

715.0366

1.11.1 Calculate the distance to the galaxy

```
[60]: H_0 = 73 # Hubble constant

      v_opt = -1410.25 # systemic velocity of the galaxy in the optical velocity
      ↪ frame (the middle of the integrated line profile)
      # note that this galaxy has a negative optical velocity. This means that it is
      ↪ moving towards the Milky Way and not away from it.
      # Only very nearby galaxies have negative velocities

      distance_hf = abs(v_opt) / H_0 # This is the way to calculate the hubble flow
      ↪ distance to galaxies

      distance = 16 # in Mpc - in the case of this galaxy the hubble flow distances
      ↪ are not accurate because the galaxy has a relatively large peculiar motion
      ↪ compared to its systematic velocity
      # for this tutorial we will use 16 Mpc for the distance of all Virgo cluster
      ↪ galaxies

      print('Comparing hubble flow distance to Virgo cluster distance:', distance_hf,
      ↪ distance)
```

Comparing hubble flow distance to Virgo cluster distance: 19.318493150684933 16

1.11.2 The HI mass of the galaxy

```
[61]: #S_int = 70.50
      m_HI = 2.36 * 10**5 * S_int * distance**2
      m_HI_data = 2.36 * 10**5 * S_int * distance_hf**2
      print(r'HI mass in units of 10{8} M{sun}:', m_HI/10**8)
      print(m_HI_data/10**8)
```

HI mass in units of 10^{8} M_{sun}: 431.996525
629.7769837668945



epoch

**Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje**

**UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y
DOCUMENTAL**

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 19 / 04 / 2023

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: Oscar Andrés Martínez Espinosa
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Física
Título a optar: Físico
Analista de Biblioteca responsable: Ing. Rafael Inty Salto Hidalgo


0607-DBRA-UPT-2023
