

Teorico Astronomia Extragalactica

1 Cantidades importantes

1.1 Magnitud Absoluta

- Fuente: http://csep10.phys.utk.edu/OJTA2dev/ojta/c2c/ordinary_stars/magnitudes/absolute_tl.html

$$M = m - 5 \log(d[\text{pc}] / 10) \quad (1)$$

O bien:

$$d[\text{pc}] = 10^{(m - M + 5)/5} \quad (2)$$

1.2 El teorema del Virial

El teorema del virial relaciona la energia cinetica con la energia potencial en sistemas gravitacionalmente ligados y en equilibrio. La ecuacion es la siguiente:

$$2K + U = 0 \quad (3)$$

2 Conocimientos previos Necesarios

Una vision muy completa sobre radiacion: <https://www.cv.nrao.edu/~sransom/web/Ch2.html>

El cosito de la ene no va arriba si no al medio. Basta igual con copiar y pegar.

2.0.1 Parametros de la radiacion de Campo



Figure 1.

El diferencial de energia que fluye desde el angulo solido hacia el area proyectada $dA \cos \theta = d\sigma \cos \theta$, en el tiempo t en una banda estrecha de frecuencias $d\nu$, es el indicado en la ecuacion:

$$dE_\nu = I_\nu \cos \theta d\sigma d\Omega dt d\nu$$

El termino I_ν se denomina intensidad especifica.

Teniendo en cuenta la definicion de potencia como energia por unidad de tiempo, tendríamos:

$$dP[\text{watts}] = \frac{dE_\nu}{dt} = I_\nu (\cos \theta d\sigma d\Omega d\nu) [m^2 \text{ ster Hz}]$$

De manera que la **intensidad especifica O brillo especifico** se puede expresar como:

$$I_\nu = \frac{dP}{\cos \theta d\sigma d\Omega d\nu}$$

En lugar de definirla con la frecuencia tambien la puede definir con la longitud de onda: I_λ .

- Teorema: Specific intensity is conserved (is constant) along any ray in empty space.
- Corolario 1: **Brightness is independent of distance.** Thus the camera setting for a good exposure of the Sun would be the same, regardless of whether the photograph was taken close to the Sun (from near Venus, for example) or far away from the Sun (from near Mars, for example), so long as the Sun is resolved in the photograph.
- Corolario 2: **Brightness is the same at the source and at the detector.** Thus you can think of brightness in terms of energy flowing out of the source or as energy flowing into the detector

No passive optical system can increase the specific intensity or total intensity of radiation. If you look at the Moon through a large telescope, the Moon will appear bigger (in angular size) but not brighter.

If a source is discrete, meaning that it subtends a well-defined solid angle, the spectral power received by a detector of unit projected area is called the flux density S_ν of the source:

$$I_\nu = \frac{dP}{\cos \theta d\sigma d\Omega d\nu} \Leftrightarrow I_\nu \cos \theta d\Omega = \frac{dP}{d\sigma d\nu}$$

Podemos definir entonces:

$$S_\nu = \int_{\text{source}} I(\theta, \phi) \cos \theta d\Omega$$

Por lo general: $\cos \theta \approx 1$, de manera que: $S_\nu = \int_{\text{source}} I(\theta, \phi) d\Omega$.

Es muy interesante lo siguiente:

In practice, when should **spectral brightness** I_ν and when should **flux density** S_ν be used to describe a source?

If a **source** is **unresolved**, meaning that it is much smaller in angular size than the **point-source response of the eye or telescope observing it**, its flux density can be measured but its spectral brightness cannot.

To the naked eye, the unresolved red giant star Betelgeuse appears to be one of the brightest stars in the sky. Yet calling it a “bright star” is misleading because the total intensity of this relatively cool star is lower than the total intensity of every hotter but more distant star that is scarcely visible to the eye.

Betelgeuse appears “brighter” than most other stars only because it subtends a much larger solid angle and therefore its flux is higher. If a source is much larger than the point-source response, its spectral brightness at any position on the source can be measured directly, but its flux density must be calculated by integrating the observed spectral brightnesses over the source solid angle.

Consequently, **flux densities are normally used to describe only relatively compact sources.**

Las unidades de densidad de flujo del sistema MKS son $Wm^{-2}Hz^{-1}$, son demasiado grandes para uso astronomico, por lo cual se tienen las unidades jansky:

$$1 \text{ [jansky]} = 10^{-26} Wm^{-2} Hz^{-1}$$

Los astrónomos ópticos típicamente expresan las densidades de flujo como magnitudes AB en jansky. Estas se definen como:

$$\text{AB magnitude} = -2.5 \log_{10} \left(\frac{S_\nu}{3631 \text{ jansky}} \right)$$

A diferencia del brillo I_ν **el flujo depende de la distancia a la fuente:** $S_\nu \propto d^{-2}$.

Destáquese que **el brillo** I_ν es una propiedad intrínseca de la fuente y por lo tanto **no depende de la distancia.**

El flujo total puede definirse como la integral total de la densidad de flujo en el rango de frecuencias:

$$S = \int_0^\infty S_\nu d\nu$$

Se destaca que los astrónomos rara vez utilizan esta cantidad, si no que en lugar de ella utilizan la densidad de flujo sin el subscript ν lo que puede ser potencialmente muy confuso.

Se define la densidad de luminosidad de una fuente isotrópica, radiando en el espacio libre a una distancia d del observador como:

$$L_\nu = 4\pi d^2 S_\nu$$

Cabe destacar que la distancia d debe ser mucho mayor a las dimensiones de la fuente.

Obsérvese que **la luminosidad** intrínseca es una propiedad de la fuente y **no depende de la distancia** ya que al ser S_ν proporcional a d^{-2} esta se cancela con d^2 en la expresión. Por otro lado esta expresión no es válida para fuentes no isotrópicas como los cuasars.

Finalmente podemos computar la luminosidad total integrando sobre todas las frecuencias:

$$L = \int_0^\infty L_\nu d\nu$$

2.0.2 Escala de Magnitudes

Considere dos fuentes con flujos S_1, S_2 que tienen asociadas a estas las magnitudes m_1, m_2 . La relación que existe entre estas está dada por la siguiente ecuación:

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log \left(\frac{S_1}{S_2} \right) \Leftrightarrow \frac{S_1}{S_2} = 10^{-0.4(m_1 - m_2)}$$

- Las fuentes más brillantes tienen asociadas magnitudes más chicas. Por ejemplo si $S_1 > S_2$, después: $\log(S_1/S_2) > 0$ [$\log(1) = 0$] $\Rightarrow m_1 - m_2 < 0$ (Por culpa del factor multiplicativo -2.5) entonces esto implica que $m_1 < m_2$.

- Las observaciones astronomicas se realizan utilizando filtros, la magnitud aparente de un objeto observado con el filtro X es m_X . En general en lugar de anotar m_X se anota simplemente X .
- Se debe especificar como es que las magnitudes medidas en diferentes filtros se relacionan entre si. Para este tipo de tarea se utilizan estrellas del tipo A0 , que son el arquetipo de la estrella Vega. Par esta estrellas se tiene la convencion de que : $U = B = V = R = I = 0$
- Si ahora , el detector tiene una funcion de transmision $T_X(\nu)$, el cual especifica la fraccion de fotones de frecuencia ν que son registrados por el detecro, si calculamos el flujo total medido por el detector:

$$m_X = -2.5 \log \left(\frac{\int T_X(\nu) S_\nu d\nu}{\int T_X(\nu) d\nu} \right) + \text{const}$$

- La constante debe determinarse con referencia a otras estrellas.
- Otro sistema comunmene utilizado es el sistema AB.

2.0.3 Estrellas

- En una definicion simple, las estrellas son esferas de gas. En sus nucleos atomos de elementos mas ligeros son transformados en elementos mas pesados a traves de procesos termonucleares que porsupuesto producen energia.
- En una aproximacion, la distribucion espectral de energia de una estrella es la misma que la de un cuerpo negro.

3 Introduccion

3.1 Introduccion Libro

- La via lactea es solo un tipo de galaxia existente en la literatura. La clasificacion mas general comprende a las elipticas y las espirales, siendo esta ultima el tipo de nuestra galaxia.
- Para entender la historia de formacion de nuestra galaxia es util una mirada hacia el pasado. Debido a la velocidad finita de la luz , observamos objetos ubicados a una gran distancia en estadios evolutivos mas retrasados. Actualmente podemos observar objetos a un 10% de la edad total del universo.
- Se han introducido grandes avances en la instrumentacion que permite la recoleccion de datos. Un ejemplo son las camaras CCD (Charged-Coupled Devices) que han reemplazado las placas fotograficas por detectores opticos aumentando la sensibilidad, exactitud de las observaciones opticas. Lacamara CCD Mas grande actualmente es la del telescopio PanSTARRS-1
- Uno de los descubrimientos mas interesantes es que algunas galaxias parecen contener en su centro un agujero negro con una masa caracteristica de millones-billones de masas solares. La masa de estos objetos parece estar vinculada a otras propiedades de su galaxia progenitora.
- Observaciones detalladas de las galaxias y las asociaciones que conforman estas (Galaxy Clusters) indican que solamente del 10% al 20% de las mismas constan de estrellas y gas. Indicando que hay una suerte de masa escondida, denominada Dark Matter. La presencia de esta se infiere de los efectos gravitacionales que la misma produce.

- Se sabe que el universo se expande y que tiene una edad finita. Se sabe la edad del universo con una baja incerteza. Esta edad seria de $t_0 = 13.8 \text{ Gyr}$. En resumen la historia del universo involucra un estado extremadamente denso y caliente, denominado Big Bang, expandiendose y enfriandose al avanzar el tiempo. Pueden observarse ecos del Big Bang en la radiacion cosmica de fondo.
- El universo basicamente se compone de **5% materia barionica**, **25% materia oscura** y un **70% de energia oscura**. Esta ultima esta vinculada a la constante cosmologica Λ que introdujo Einstein.
- La via lactea es nuestra galaxia host y la que podemos estudiar con mayor detalle. En ella pueden resolverse estrellas individuales, estudiarse el medio interestelar (ISM), propiedades de las nubes moleculares y las regiones de formacion estelar. Tambien podemos examinar el fenomeno de extincion y el enrojecimiento por el polvo. Tambien podemos examinar el comportamiento de las galaxias satelites como la nube de magallanes.
- En concreto nuestra galaxia parece contar con varias **partes** que pueden diferenciarse (y que pueden encontrarse en otras galaxias)
 - **Disco delgado** de Estrellas con un radio promedio de 20kpc y una altura de 300pc
 - Un **bulge Central**
 - Un **halo** practicamente esferico, que contiene la mayoria de los clusteres globulares (*Un cúmulo globular es una conglomeración esferoidal de estrellas unidas por la gravedad , con una mayor concentración de estrellas hacia su centro. Puede contener desde decenas de miles hasta muchos millones de estrellas, [2] todas orbitando en una formación compacta y estable.*), estrellas viejas y gas con diferentes densidades.
- Algunas vistas de las galaxias son face on: Vista desde arriba, y edge on: vista de canto.
- Con una figura podemos analizar la composicion:



- El gradiente de color muestra un enrojecimiento en el centro, llegando a un color mas azulado en los brazos espirales. Se encuentran cada vez mas galaxias viejas conforme se viaja al centro.

- El disco galactico con velocidad rotacional $V(R)$, es decir en dependencia con la distancia al centro. Por otro lado podemos estrimar la masa de la galaxia utilizando la luz y el promedio luz-masa. La velocidad que se deduce de la mecanica newtoniana responde a la siguiente formula:

$$V(R) = \sqrt{\frac{GM(R)}{R}}$$

Donde $M(R)$ es la masa que se puede encontrar dentro de una esfera de radio $R = 8 \text{ kpc}$. Esto da una velocidad rotacional de: 220 km/s cuando la formula indica una velocidad de 160 km/s . Esto es pues evidencia de que la galaxia alberga mayor masa que la materia visible.

- Las estrellas y varios componentes de nuestra galaxia tienen diferentes propiedades vinculadas a su edad y su composicion quimica. **Las estrellas mas jovenes suelen encontrarse en el disco mientras que la poblacion mas vieja se encuentra en el bulge.** Se observa que el gas frio cae en el disco galactico, mientras que el gas caliente sale.
- No es posible observar, en longitudes de onda opticas, muy lejos a traves del disco de la galaxia debido a la extincion. Por ello las observaciones se hacen en otras longitudes de ondas como la infrarroja y ondas de radio. Se sabe tambien a traves de estas observaciones que nuestra galaxia alberga un agujero negro.
- Discutiremos ahora propiedades mas generales de **otras** galaxias.
- Los tipos principales de galaxias son espirales y elipticas sin embargo existen clases adicionales como las galaxias irregulares y enanas, galaxias activas y galaxias starburst. Estas galaxias no solamente se diferencian en su morfologia si no tambien en su color y diferente contenido estelar.
- Las galaxias espirales son sistemas estelares donde todavia hay formacion activa de estrellas. Por otro lado las galaxias elipticas consisten en su mayoria de estrellas viejas. Existe un tipo intermedio, denominado las S0 las cuales exhiben un disco como las galaxias espirales pero estan principalmente compuestas de estrellas viejas.
- Podemos decir de las estrellas viejas que estas tienen baja masa y baja temperatura.
- Las galaxias Elipticas y las S0, tipicamente se denominan galaxias Early Type. Mientras que las Espirales se suelen denominar Late Type.
- Las galaxias espirales contienen su materia visible dentro de lo que se conoce un halo de materia oscura. Este halo tiene una extension bastante mayor al de la materia visible.
- El estudio de los halos de materia oscura en galaxias elipticas es sustancialmente mas complicado pero su existencia se ha demostrado.
- Es de importancia el diagrama de Hertzsprung-Russell o su diagrama color-magnitud. El hecho de que la mayoria de las estrellas se alineen en lo que se denomina comunmente como secuencia principal lleva a la conclusion de que para estrellas en la secuencia principal la superficie y la temperatura no son parametros independientes. En su lugar las propiedades de las estrellas estan caracterizadas por un solo parametro: La masa estelar.
- Por otro lado varias propiedades de las galaxias no son independientes si no que estan correlacionadas, por ejemplo la velocidad rotacional esta correlacionada con la luminosidad en las galaxias espirales.
- Un hallazgo interesante es que la masa de SMBH que se encuentre en las galaxias parece estar correlacionada con la distribucion de velocidades en las galaxias elipticas y en el bulge de las espirales.

- **Expansion de Hubble del universo.** La velocidad radial de las galaxias, medida a travez del corrimiento dopler de las lineas espectrales es positiva para aproximadamente todas las galaxias, por lo cual estas parecen alejarse de nosotros. Hubble descubrio que la velocidad de escape a la cual se alejan las galaxias, parece aumentar a medida que mas alejadas estan estas. Esto ultimo esta resumido en la ley de Hubble: $v = H_0 D$
- El valor H_0 se denomina constante de Hubble, al dia de hoy se ha medido el siguiente valor: $H_0 = (71 \pm 4) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$
- El problema mas grande de determinar H_0 es poder determinar la distancia a las galaxias. Para medir las distancias normalmente se utiliza el redshift z :

$$z = \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_0}{\lambda_0}, \text{ donde } \lambda_{\text{obs}} = (1 + z)\lambda_0$$

λ_0 es una transicion en el rest frame, mientras que λ_{obs} corresponde a la longitud de onda de una transicion de un atomo ubicada a una determinada distancia.
- Para redshifts chicos uno puede asumir que: $v = zc$, se advierte que esta relacion debe ser modificada para redshifts altos.
- Volviendo a la Ley de Hubble uno calcula su distancia (objeto lo suficientemente cercano) asi:

$$v = H_0 D, \text{ y } v = zc \Rightarrow D = \frac{zc}{H_0}$$
- Aparte de la constante de Hubble usual tenemos la h pequena: $H_0 = h 100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, de manera que $h = 0.71 \pm 0.04$
- **Galaxias Activas y Starburst** Las galaxias activas son un tipo especial de galaxia que tienen una fuente de energia en su centro denominada AGN. Los mejores representantes de los AGN son los quasars, estos son objetos a alto redshift con propiedades exoticas. Su espectro por ejemplo puede mostrar lineas extremadamente gruesas: $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 0.03$, esta es una linea causada por las velocidades aleatorias y altas del gas que emite estas lineas.
- Si interpretamos el ensanchamiento de estas lineas doppler como emisiones del gas con una amplia distribucion de velocidades, obtendremos que $\Delta v = 10000 \text{ km/s}$.
- La parte central de estos objetos es mucho mas brillante que las otras partes de la galaxia.
- Muchas de las propiedades de los quasares asemejan a las de las galaxias Seyfert de tipo I. Estas son galaxias con un nucleo muy luminoso y lineas de emision anchas.
- La luminosidad total de los quasares es extremadamente alta superando en 1000 veces la luminosidad total de nuestra galaxia.
- La radiacion es producida por la materia que cae hacia el centro del agujero negro. Este proceso se denomina acrecion, esto convierte la energia en energia potencial. Si esta energia cinetica, se transforma en energia interna (calor), como sucede en el denominado disco de acrecion debido a la friccion, se produce una radiacion de energia.
- La radiacion emitida por los AGN puede ubicarse en todo el espectro electromagnetico, desde el radio (longitudes de onda grandes) a rayos gamma, longitudes de onda chicas (frecuencia alta).
- La formacion estelar se puede encontrar en las galaxias espirales, sin embargo la misma es mayor en un cierto tipo particular de galaxias: Las galaxias starburst. Estas galaxias tienen tasas de formacion estelar de 10 a 300 M_{\odot}/yr . Las galaxias starburst son afectadas y a veces iniciadas, por inestabilidades gravitatorias.
- Las galaxias starburst suelen ser muy luminosas en el FIR. Esto es debido a la presencia de polvo en estas regiones, el cual absorbe gran parte de la radiacion UV (muy energetica).

- Voids , Clusters, y DM. Se hallan correlaciones entre las posiciones de las galaxias. Hay regiones del espacio con gran densidad de galaxias , por otro lado a su vez existen regiones con una menor densidad de galaxias.
- Los clusters de galaxias son sistemas gravitacionalmente ligados de cientos o mas galaxias contenidos en un volumen con diametro de $2h^{-1}\text{Mpc}$. Predominantemente los clusters contienen galaxias tipo EARLY, de manera que hay mucha formacion estelar en los mismos.
- El cluster de galaxias mas cercano a nosotros es el de Virgo a 18Mpc, con una distribucion irregular de galaxias. El cluster Regular mas cercano es el de COMA a unos 90 Mpc.
- Puede estimarse la masa de un cluster de galaxias a partir de la luminosidad de las galaxias componentes. Posteriores mediciones demostraron que los clusteres de galaxias son potentes emisores de Radiacion X.
- La temperatura del cluster esta vinculado a la profundidad que debe tener el pozo de potencial para evitar que el gas se escape. Nuevamente puede verse que la masa que deberia tener el cluster excede al de la masa visible.
- Muchos de los clusters no han tenido la oportunidad de relajarse y evolucionar hacia un estado de equilibrio.
- Ademas de los conglomerados masivos de galaxias como los cluster, existen los grupos, que son conglomerados mas chicos. La cantidad de grupos es mucho mayor al de los clusters.
- **World Models** Recordemos que a alto redshift la forma simple de la ley de Hubble no es valida, y sera necesario generalizar la relacion entre distancia y redshift. Para ello se debe tener en cuenta que la fuerza dominante en el universo es la gravitacion. La teoria mas general universalmente aceptada sobre la gravedad es la de Einstein. Asumimos 2 hipotesis principales:
 - Nuestra ubicacion no es privilegiada y no es distinguible de otras locaciones en el universo.
 - La distribucion de materia en el universo es isotropica.
- Basados en las hipotesis anteriores podemos construir modelos de universo homogeneos e isotropicos. Estos modelos se denominan Friedman-Lemaitre Models. Estos obedecen las leyes de la relatividad general. En lineas generales estos modelos estan caracterizados por 3 parametros:
 - Constante de Hubble H_0
 - La densidad media de materia en el universo: $\rho_m \Rightarrow \Omega_m = \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_m$
 - Densidad de la energia de vacio Λ , $\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda}{3H_0^2}$
- Los valores cosmologicos anteriores se conocen bastante bien hoy: $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$
- De acuerdo a los modelos de Friedman-Lemaitre el universo solia ser similar y mas caliente en el pasado y se ha ido enfriando continuamente. Este modelo ha realizado una serie de predicciones que se han logrado verificar de forma convincente:
 - Almenos 1/4 de la materia barionica del universo debe ser helio, que se formo a partir de almenos 3 minutos despues del big bang mientras que el resto consiste de hidrogeno.

- De la cantidad de helio presente uno puede derivar las familias de neutrinos. Entre mas familias de neutrinos existan mas helio deberia haber en el universo. En 1981 se observo que hay 3 familias de neutrinos.
 - La radiacion termica de las etapas tempranas del universo deberia ser todavia medible. (Radiacion de fondo de microondas)
 - Las estructuras de hoy en el universo, han evolucionado de las fluctuaciones cuanticas en el universo primigenio. Estas fluctuaciones deben verse como pequenas fluctuaciones de temperatura en el fondo de radiacion de microondas. WMAP muestra estas fluctuaciones.
 - El modelo parece no contradecir ninguna observacion fundamental en la cosmologia. Sin embargo como trade off, el 95% de el contenido del universo todavia no se comprende.
 - La relacion entre el redshift y el tiempo de la primera emision de luz en el universo depende de los parametros cosmologicos, H_0 , Ω_m , Ω_Λ .
 - Si consideramos $\Omega_m = 1, \Omega_\Lambda = 0$ tenemos un universo denominado Einstein-de Sitter, en el mismo: $t(z) = \frac{2}{3H_0} \frac{1}{(1+z)^{3/2}}$, en particular, a redshift cero, que es el tiempo presente, habrian transcurrido supuestamente: $t(0) = 6.5 \times 10^9 h^{-1} \text{yr}$.
 - El universo no sigue el modelo de Einstein de-sitter, ya que cumple: $\Omega_m < 1, \Omega_\Lambda > 0$. Sin embargo el modelo sirve para hacer estimativos.
- Formacion de estructuras y evolucion Galactica. En un principio las anisotropias en el CMB eran muy chicas en la epoca de la recombinacion, siendo que ahora el universo exhibe grandes fluctuaciones de densidad. Entonces una sobredensidad se amplifica al pasar el tiempo. El crecimiento de estas sobredensidades seran las que forman las estructuras a gran escala que vemos hoy. Por otro lado las inestabilidades gravitatorias son las responsables de las galaxias y los clusters.

4 Cosmologia

5 Historia del Universo

6 Galaxias

6.1 Resumen del Teorico de Hernan

- Componentes de las galaxias:
 - Estrellas
 - Gas y polvo: Las estrellas se forman a partir del gas y el polvo sale a partir del feedback(?)
 - Materia oscura

- Todos los componentes anteriores se encuentran ligados gravitacionalmente.
- Subsistemas:
 - Disco: Es donde se acumula la mayor cantidad de estrellas jóvenes (Comunmente denominada Poblacion I). Ademas contiene gas y polvo. Se destaca que el polvo 'fino' se utilizaria para la formacion estelar y el mas grueso corresponde a residuos.
 - Bulbo: Corresponde a la region central y posee una mayor poblacion de estrellas viejas (Comunmente denominada Poblacion II) y enrojecidas. Tiene poca cantidad de polvo y gas (Hay mucha menor formacion estelar) y tiene un volumen mucho menor al del disco.
 - Halo: Es una region que rodea al Bulbo y al disco y tiene estrellas viejas, tiene poco gas y polvo y muchos cumulos globulares (Un *cúmulo globular* es un conjunto esférico de estrellas que, por lo general, orbita un núcleo galáctico como si de un satélite se tratara.), tiene un volumen mayor, es extendido y difícil de observar.
 - Barra: Presente en algunos tipos de galaxias.
- Clasificacion Morfologica:
 - Galaxias Normales: Radiacion de Origen termico, hay galaxias de gran tamaño asi como enanas.
 - Galaxias Peculiares: Son galaxias que no se ajustan al sistema de clasificacion de Hubble. [Interactuantes y con AGN]
- Las glaxias no estan aisladas, tienen una dependencia importante con el entorno.
- Sistema de Clasificacion de Hubble: Es un sistema de clasificacion segun la morfologia vista en el optico, la banda B. El mismo fue desarrollado por Hubble en 1926.
 - E: Elipticas (Tambien conocidas como tempranas o Early Type) , son esferoidales con una distribucion uniforme de estrellas, tienen poco gas y polvo. Se las clasifica segun sus achatamientos. Se define el parametro de elipticidad a traves de sus semiejes aparentes: $\varepsilon = 1 - \frac{b}{a}$ y se le asigna la parte entera de 10ε . Las E0 son las mas esfericas mientras que la E7 es la mas apalanada.
 - SO/SBO: Lenticulares, grupo de transicion no evolutivo, espirales sin brazos o elipticas con disco. B indica barra.
 - S: Espirales, tambien denominadas late type (Tardias). Tienen una concentracion de estrellas central y un disco con brazos espirales desde el final de la barra o alrededor de la protuberancia. Pueden ser espirales puras o barradas (SB). Estas tienen las siguientes sub-clases:
 - Sa/SBa : Bulbos mas prominentes respecto al disco ($L_B/L_D = 0.3$), brazos espirales mas cerrados y distribucion de estrellas suave.
 - Sc/SBc : Bulbo mas chico relativo al disco, ($L_B/L_D = 0.05$) brazos mas abiertos y fragmentados.
 - Irr: Irregulares, no encajan en ninguna categoria.

- Notas: La anterior es una clasificación en el óptico solamente y de acuerdo a la proyección que veamos de las galaxias en el universo cercano, al aumentar z aumenta el número de galaxias peculiares.
- Hubble creyó incorrectamente que esta clasificación era una secuencia evolutiva en la vida de las galaxias, por eso llamo a las de la izquierda tempranas (Elípticas) y las de la derecha, tardías (Espirales).
- En la secuencia la masa crece de $S \rightarrow E$, mientras que el gas crece: $E \rightarrow S$. Por otro lado, el momento angular crece hacia las S .
- Hay otros sistemas de clasificación morfológico:
 - Holmberg: No distingue por barra a las espirales
 - De Vaucouleurs: Más observativo, extiende Hubble, agrega S intermedias, estructuras anulares, etc.
- Propiedades Básicas de los distintos tipos Morfológicos.
 - Espirales S o tardías:
 - Presentan un disco plano prominente de estrellas jóvenes de Población I, gas y polvo, son activas en la formación estelar.
 - Se puede identificar un disco fino: 300-400 pc de espesor, tiene la mayoría de las estrellas y las más jóvenes, además de gas y polvo.
 - Disco Grueso: Tiene un 1kpc de espesor, tiene las estrellas más viejas y pobres en metales.
 - Presentan Brazos espirales, brazos luminosos con formación estelar reciente dentro del disco que se prolongan desde el centro. Tienen distintas morfologías: Numerosos/cortos/asimétricos o Largos/continuos/simétricos o multi arm: Dos brazos importantes y simétricos con brazos menores en las regiones externas.
 - Tienen un bulge esferoidal Central, formado por estrellas viejas y pobres en metales (Población II). Tienen alta dispersión de velocidad. Contienen un SMBH en el núcleo.
 - El disco y el bulge están rodeados por un Halo que tiene una distribución esférica de estrellas viejas, materia oscura y cúmulos globulares (No muy numerosos).
 - Pueden presentar barras en la zona central, las mismas son resultado de inestabilidades en el disco y están conectadas a la naturaleza dinámica de la galaxia. Puede generar inestabilidad que hace que se redistribuya el momento angular entre la materia bariónica y la materia oscura. Al perturbar órbitas el gas puede ser impulsado al centro de la galaxia desencadenando actividad nuclear. Ayudan a la formación de los brazos y el bulge. El número de galaxias con barras decae con z .
 - El grado de preponderancia del bulge define la secuencia de Hubble: Relación de Luminosidad Decreciente: $S_a L_B/L_D = 0.3$, $S_c L_B/L_D = 0.05$

- El elemento basico para la existencia del disco es el momento angular. Con esto podemos darnos cuenta que las espirales tienen un gran momento angular.
- La rotacion de la galaxia no es necesariamente en la direccion obvia en la que se ven los brazos, en general es asi (trailing arm) pero no siempre. Es tipico que sea una rotacion diferencial (Mas rapida en el centro). Tambien pueden encontrarse casos de contra-rotacion, siendo que una parte rota en una direccin y la otra hacia el otro. Estos fenomenos son causados por su historia y evolucion : acreciones de satelites y fusiones que calientan el sistema los cuales alteran el momento angular.
- Las nubes de Hidrogeno que hay en el halo son esenciales para que se sigan formando estrellas. Este gas es continuamente acretado por la galaxia y el mismo calienta la misma.
- Puede haber gas tibio en el halo, calentado por el equilibrio en el potencial que no es facil de usar como combustible, habria que enfriarlo para poder acretarlo.
- Nota Mia, recordar que segun el libro de Schneider (Introduccion) El gas frio cae hace la galaxia y el gas caliente sale.
- Si se aislara la galaxia, esta se apagaria mas rapido dado que las mismas no son autosuficientes.
- Numeros de la Milky Way:
- Elipticas (E):
 - Tienen una distribucion homogenea y esferoidal de estrellas de poblacion II (Viejas Rojas y pobres en Metales) parecidos a un gran bulge donde casi no hay polvo ni gas.
 - Hay evidencias de un disco fino.
 - Tiene una importante poblacion de cumulos globulares en sus halos. En las galaxias del cumulo de virgo estos cumulos globulares se pueden resolver.
 - De la proyeccion no se puede saber si son axisimetricos o triaxiales.
 - Clasificacion E0-E7 con la parte entera de 10ε , $\varepsilon = 1 - b/a$
 - Las propiedades fisicas pueden variar enormemente. Por ejemplo Mag Abs : $[-8, -23]$ masa total: $M \in [10^7, 10^{13}]M_{\odot}$

6.2 Libro

6.2.1 Clasificacion De galaxias

- La clasificacion de objetos depende del tipo de observacion que se haga. Historicamente la optica fotometrica fue la utilizada para observar las galaxias resultando en que el sistema de clasificacion de Hubble sea conocido hasta el dia de hoy.
- El sistema de Hubble da una clasificacion morfologica de las galaxias , pero otros tipos de clasificaciones pueden hacerse en base a otros criterios como: indices de color, parametros espectroscopicos(Los cuales estan basados en lineas de emision y absorcion) o distribucion en banda ancha.
- No todas las galaxias entran dentro de la clasificacion Morfologica de Hubble.

6.2.2 Clasificación Morfológica de Hubble.



Figure 2. La Figura muestra el sistema de clasificación de Hubble.

Según este sistema:

- Galaxias Elípticas:
 - Tienen isofotas con forma elíptica. Las isofotas son contornos donde el brillo superficial es aproximadamente constante.
 - Se dividen según su coeficiente de elipticidad $\varepsilon = 1 - \frac{b}{a}$, donde a, b denotan el semieje mayor/menor de la elipse respectivamente. Por lo general $0 < \varepsilon < 0.7$. La notación para clasificarlas suele ser: En donde $n = 10\varepsilon$, por ejemplo si $\varepsilon = 0.7 \Rightarrow E7$. A modo de otro ejemplo, si el cociente de ejes es $b/a = 0.6 \Rightarrow \varepsilon = 0.4$, estamos hablando de una E4.
- Galaxias Espirales:
 - De forma simple, las galaxias espirales consisten en una estructura con forma de disco, brazos espirales y un bulbo central. Estas suelen dividirse en dos tipos: S (Denominadas espirales normales) y SB (Denominadas espirales Barradas).
 - En cada una de las dos clasificaciones anteriores existe una subclasificación: a, ab, b, bc, c, cd, d. Esta clasificación está ordenada de acuerdo al cociente de brillo entre el bulbo y el disco.
 - Los objetos a lo largo de dicha secuencia suelen denominarse Early type o Late Type, una galaxia Sa se suele denominar Early, mientras que una SBc se suele denominar Late type.
- Galaxias Irregulares:
 - Estas son galaxias con una estructura débil o bien no regular. Según qué tan regular sea su estructura pueden clasificarse como: Irr I (La más regular), Irr II (La menos

regular).

- La secuencia de espirales parece poder estarse incluyendo la letra m, para denotar espiral - magallanica, donde magallanica hace referencia a la nube de magallanes un tipo de galaxia irregular que orbita nuestra galaxia.
- Galaxias S0
 - Parecen ser una especie de transicion entre las galaxias elipticas y las espirales. Cuentan con un bulbo y una region extensa que las envuelve que tipicamente parece un disco sin brazos espirales.
- La clasificacion Morfologica esta fuertemente afectada por efectos de proyeccion, dependiendo de como este orientada la galaxia podra masomenos determinarse de que tipo es.
- Existe un conjunto de galaxias que no parece encajar con este esquema, los cuales se propone que sea debido al efecto de interacciones entre galaxias.

6.2.3 Otros tipos de Galaxias

- La luz de lo que considerariamos como galaxias normales es emitida principalmente por estrellas. Por lo cual el espectro de estas galaxias es una superposicion de los espectros de las estrellas que la componen. El espectro de las estrellas esta descrito, en una primera aproximacion por la plankiana:

$$I_{\lambda}(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)}$$

Como puede verse este espectro depende de T. Una poblacion estelar tipica cubre un rango tipico de temperaturas entre $[1000K, 10000K]$. Para la ecuacion anterior, si hacemos la busqueda del maximo, mediante la derivada, obtenemos $\lambda_m = \frac{hc}{4.965 kT}$. Este es un maximo bien definido, luego la caida de la plankiana es pronunciada, por lo cual para cada Temperatura hay un rango corto de longitudes de onda/frecuencias asociados a un espectro. Este rango de frecuencias tipicamente abarca el visible asi como NIR.



- Existen sin embargo galaxias cuyo brillo no puede ser descripto por la superposicion de los espectros de sus estrellas. Un ejemplo de este tipo de galaxias son las galaxias activas que deben una parte significativa de su brillo a la energia gravitacional debida a la caida de materia en el agujero negro. Este tipo de objetos puede verse entre la porcion de Rayos X y Radio del espectro.
- Otro tipo de galaxias que no son consideradas “normales” son las starburst. Si una galaxia espiral comun tiene una SFR de $3M_{\odot}/\text{yr}$ una galaxia starburst puede tener una tasa de $1000M_{\odot}/\text{yr}$.
- Sobre las Starburst lo siguiente es muy interesante:
 - Si muchas estrellas se estan formando en una galaxia starburst, se esperaria que la luz que nos llega de ella fuera fuertemente azul o UV, rango que corresponde a las estrellas mas masivas y luminosas.
 - Sin embargo, la formacion estelar ocurre en nubes moleculares densas que absorben toda esta luz, la cual reemite esta energia absorbida en el rango infrarrojo. Estas galaxias son extremadamente luminosas en el IR.
- Sobre las Galaxias starburst se habla en 9.3.1

6.2.4 Distribucion Bimodal de Colores de las Galaxias.

- Una alternativa a la clasificacion morfologica de las galaxias puede hacerse utilizando los colores de las mismas que puede ser obtenida de imagenes en banda ancha. Ventajas de esta metodologia es que los colores son mas faciles de medir y ademas estan vinculados a propiedades de las galaxias.
- En el paper de Baldry del 2024 (<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2004AIPC..743..106B/abstract>) se ha estudiado el color y las magnitudes absolutas

7 Grandes Relevamientos

8 Espectros de Galaxias

9 Interacciones y fusiones de Galaxias

10 Funcion de luminosidad de las galaxias

11 Tamanios de las Galaxias

12 Galaxias y su entorno

13 Enfriamiento Radiativo

14 Formacion Estelar

15 Indicadores de Distancias

15.1 Teorico de Hernan

- Una de las principales motivaciones para medir distancias es calibrar el redshift ($v = H_0 d = cz$) utilizando la ley de Hubble con la distancia. Medir las distancias permiten calibrar la constante de Hubble de forma precisa y conocer la cosmologia. H_0 es importante para probar la hipotesis de la constante cosmologica, medir la ecuacion de estado de la energia oscura, expansion acelerada bien calibrada $\Omega_{\text{tot}} = 1.02$, $\Omega_1 = 0.73$, $\Omega_b = 0.044$, $\Omega_m = 0.27$, $t_{\text{CMB}} = 2.725$, $h = 0.71$, $t_0 = 13.7\text{Gyr}$.



- El valor de H_0 ha cambiado con el tiempo , el día de hoy: $H_0 = 72 \pm 7 [\text{km s}^{-1} \text{ mpc}^{-1}]$. De la misma forma los valores de la cosmología han cambiado bastante con el tiempo.
- Medición de Distancias: La distancia comóvil χ (La cual constituye una distancia independiente de la expansión) y la distancia propia $a(t)\chi$ no son observables ya que la luz vista en el presente fue emitida mucho antes.
- Son considerados como observables objetos con tamaño D , luminosidad L y distancia d , tamaño angular θ y flujo F . Con estos puede definirse:
 - Distancia diámetro angular: $\theta = \frac{D}{dA}$, $dA = \frac{at_0\chi}{1+z}$
 - Distancia luminosidad: $F = \frac{L}{4\pi d_L^2}$, $d_L = at_0\chi(1+z)$
 - En un universo estático $dA = dL = d$, en un universo en expansión no.
- **Indicadores de distancias**
- Los indicadores de distancias son aquellos que tienen una medida característica en los que uno puede medir un valor medio y una dispersión.
- Una suposición importante es que algo que se mide acá y en otro lugar tienen las mismas propiedades (salvo que tengamos en cuenta la evolución).

- Se los asocia graficamente con una escalera, donde cada peldanio se construye a partir del anterior. Cada nuevo peldanio va introduciendo nuevos errores. Cada indicador tiene un rango de aplicacion y sus limitaciones y se calibra con el anterior.
- Historicamente existen dos tipos de indicadores de distancia:
 - Primarios: Correspondientes a objetos que se encuentran dentro de nuestra galaxia.
 - Secundarios: Objetos que se encuentran fuera de nuestra galaxia y son calibrados con algun indicador primario.
 - Este concepto vario en los ultimos tiempos.
- Un ancla importante para realizar calibraciones es la *Nube de Magallanes*.
- Hay muchos indicadores que no depende de z , lo cual los hace muy buenos para realizar calibraciones.
- Indicadores de distancias clasicos:



- La imagen refleja bien el concepto de escalera de distancias, puede verse como distintos indicadores estan basados en otros ademas de que existen otros que permiten determinar directamente la constante de Hubble.
- Veamos la lista de indicadores de distancias clasicos:
 - Estrellas Variables Cefeidas Clasicas

- Cumulos Globulares
 - RR Lyrae
 - Novas
 - Supernovas 1a
 - Relacion Tully Fisher
 - Dn- σ (Plano Fundamental)
 - Nebulosas Planetarias
 - Fluctuaciones en el Brillo Superficial.
 - Masers
 - Detached Eclipsing Binaries
 - Efecto Sunyaev - Zeldovich
 - Lentes Gravitacionales.
- **Cefeidas**
 - Muestran variabilidad en el brillo. Gana la gravedad hasta que se da un proceso fisico interno y empieza a ganar la presion. La variacion de causa cambios en la (T_{eH}) en el brillo de manera periodica.
 - Relacion Periodo Luminosidad, mayor masa mayor periodo. Se miden muchas en una galaxia para hacer mas precisa la curva de luz.
 - Si el radio medio de una cefeida puede ser determinado entonces su tamaño angular puede determinar su distancia. El radio angular puede determinarse por mediciones directas (ocultaciones lunares, interferometria de Michelson) o inferido de forma indirecta (brillo superficial).
 - Se usan cefeidas de LMC, para calibrar pero con galaxias que tienen su metalicidad baja. Se corrige por metalicidad la relacion P-L.
- **Cumulos Globulares**
 - Tipicos en las galaxias tempranas. Indicador empirico. Calibracion del metodo: determinar la magnitud absoluta del turnover M_0 y la dispersion σ del GCLF independiente en muchas galaxias.
 - Lo testean en Fornax y Virgo, la dispersion sigma es menor. Para las galaxias mas debiles a mayor $d\sigma$ de velocidad, M_0 es mas debil. CO mas jovenes mas brillantes. M_0 mas debil para galaxias mas debiles.
 - Los CO tienen propiedades que hacen que no sean muy buenos indicadores de distancias, no son muy independientes (dependen de propiedades de la galaxia y del cumulo como un todo). Sensibles a la edad, entorno, dispersion de velocidad del cumulo.
- **Novas**
 - Sistema binario proximo donde una componente donde una enana blanca.
 - Muestran un fuerte incremento de la luminosidad debido a reacciones termo-nucleares en la superficie de las enanas, debido a la acrecion de H de la companiera mas pequena. Poblacion Vieja.
 - No estan afectados fuertemente por la metalicidad.

- **Supernovas Ia**
- Supernovas tipo II
 - Las estrellas individuales masivas ($M > 8M_{\odot}$) al final de su vida en la secuencia principal forman super gigantes rojas las cuales experimentan explosiones de SN II, dejando un nucleo de estrellas de neutrones o BH. En ellas se observa Hidrogeno y se encuentra principalmente en brazos de las espirales jovenes. Rol fundamental, feedback principalmente en el universo temprano, cuando habia mas SF. SN II mas comunes es $z \sim 1 - 2$, hoy tenemos en la milky way cada 600 años.
- Supernovas tipo I
 - Se deben a la evolucion de un sistema binario formado por una enana blanca y una estrella de secuencia principal (sp). La sp transfiere material a la enana blanca cuando esta alcanza el *limite de chandresakar* de $1.4 M_{\odot}$ y ya no puede sostenerse por si misma, explotando como una supernova.
 - *El límite de Chandrasekhar es la máxima masa posible que puede llegar a alcanzar una estrella de tipo enana blanca, cuyo cálculo se debe a Subrahmanyam Chandrasekhar. Si se supera este límite, la estrella colapsará en una explosión termonuclear, conocida como supernova de tipo Ia, que es un tipo de supernova de tipo I.*
 - Se dividen en Ia, Ib y Ic. Las Ia se deben a la implosion de enanas blancas de $1.4 M_{\odot}$. Todas tienen la misma cantidad de combustible para quemar, de manera que tienen la misma luminosidad constituyendo una “standard candle”.
 - Se correlaciona el tiempo de decaimiento de la curva de luz con la magnitud absoluta. Se busca obtener la curva de luz completa porque es necesario observar bien antes, durante y despues del pico. Es recomendable una observacion espectroscopica de estos objetos (Tiene un espectro caracteristico que da detalle de su origen y propiedades).
- Nebulosas Planetarias
 - Estadio corto y final de las estrellas de masa media.
- Fluctuaciones de brillo superficial
 - Cuando se observa una galaxia lejana el perfil de brillo superficial no es uniforme si no que presenta fluctuaciones pixel a pixel generados por las estrellas gigantes rojas. Mientras mas lejos este la galaxia su brillo superficial se ve mas suave en comparacion con las mas cercanas.
 - Esto puede utilizarse como indicadores de distancia ya que el numero N de estrellas que entran en un pixel crecen con la distancia al cuadrado. Mientras el flujo de las estrellas disminuye con la distancia al cuadrado. Entonces el cociente $\frac{\sum n_f^2}{\sum n_f}$ depende de la distancia d^{-2} .
- **Nuevos indicadores**
 - Maser: Fuente natural de emision estimulada de lineas espectrales, tipicamente la banda de microondas del espectro.

- Se utiliza la emision de Masers por un disco de acrecion alrededor de un BH supermasivo
- Binarias Eclipsantes separadas
 - Con sus curvas de luz se puede obtener periodo inclinacion, excentricidad, ω , temperatura cociente de radios y de flujos con los espectros. Semi amplitudes de la velocidad radial, e, ω , temperatura.
- Indicadores de Galaxias Elipticas
 - Como conjunto muestran correlacion entre sus parametros globales.
 - **Relacion Color - Magnitud:** Las galaxias mas brillantes tienen las lineas de absorcion mas intensas y son en general mas rojas.
 - **Relacion de Faber-Jackson:** Indica la relacion enre la dispersion de velocidad central σ (del bulge) y la magnitud total de la galaxia eliptica (Luminosidad): $L_B \propto \sigma^4$
 - Se puede ver que a mayor dispersion mayor luminosidad.
 - Es una relacion con mucha dispersion lo que lo convierte en un indicador de distancia pobre.
 - **Relacion Brillo superficial - Radio Efetivo:** Las galaxias mas grandes tienen menor brillo superficial.

15.2 Schneider , teorico Vale y otras fuentes

Referencias:

- Capitulo 3.9 Extragalactic distance determination
- Capitulo 3.4 Scaling Relations

Otras:

- Relacion Tully Fisher: <https://www.youtube.com/watch?v=mJqzBHYT6qM>

15.2.1 Dinamica

- La dinámica de las galaxias elípticas y los bulbos de las galaxias de disco se estudian mediante los **cambios Doppler** y los **ensanchamientos de las líneas de absorción estelar**.
- Dado que una *línea de absorción* dada es la suma de las contribuciones de *muchas estrellas individuales*, su **desplazamiento Doppler** da su **velocidad media**, mientras que su **ensanchamiento** se incrementa en una cantidad que depende de la **dispersión de las velocidades** estelares alrededor de la media.

- Al observar cómo se comportan las longitudes de onda y los anchos de las líneas espectrales como funciones del radio, se puede obtener una idea de la distribución de la masa en la galaxia.



Figure 3. Estrella NO-rotante vs estrella rotante. Puede observarse que para la estrella rotante hay un ensanchamiento de la línea de absorción.

- Órbitas de las estrellas en el disco: Las estrellas del disco orbitan todas en la misma dirección con apartamientos relativamente pequeños respecto del plano del disco hacia arriba y hacia abajo.



- Órbitas Estelares en el Halo: Las órbitas de las estrellas del halo tienen orientaciones aleatorias en el espacio.



- La **dependencia radial** de la **dispersión de la velocidad** proporciona información sobre la **distribución de masa** dentro de la galaxia. Dado que también depende de cómo se distribuyen las formas de las órbitas estelares en la galaxia, su interpretación requiere modelos dinámicos detallados.
- Algunas elípticas tienen diferentes sistemas de velocidad. Un caso extremo es el NGC 4550 clasificado como E7/S0. La mitad de sus estrellas orbitan el centro en una dirección y el resto en la dirección opuesta. Esto indica que la galaxia es una fusión de dos galaxias espirales que originalmente giraban en direcciones opuestas.

15.2.2 Sistemas de Rotación

- En las galaxias **espirales**, la **distribución de masa** se puede estudiar **directamente** utilizando las **velocidades de rotación** observadas del **gas interestelar**. Esto puede observarse en longitudes de onda ópticas de las líneas de emisión de **gas ionizado** en las **regiones H II** o en longitudes de onda de radio de la línea de **21 cm de hidrógeno neutro**
- El comportamiento cualitativo de la curva de rotación en todas las galaxias espirales es similar a la curva de rotación de la Vía Láctea: hay una **porción central**, donde la **velocidad de rotación** es directamente **proporcional al radio**, correspondiente a la rotación del cuerpo rígido.
- En un radio de pocos kpc, la curva se da vuelta y se vuelve plana, es decir, la velocidad de rotación no depende del radio.
- En los primeros tipos de Hubble, la curva de rotación se eleva más abruptamente cerca del centro y alcanza mayores velocidades en la región plana (Sa unos 300 km/s, Sc unos 200 km/s).
- Una **velocidad de rotación** más **alta** indica una **masa mayor** y, por lo tanto, los tipos **Sa** deben tener una densidad de **masa mayor cerca del centro**. Esto no es inesperado, ya que un bulbo más masivo es una de las propiedades definitorias de los primeros tipos de espirales.

15.2.3 El hidrogeno Neutro

Cuando un electrón de un átomo de Hidrógeno neutro pasa de un nivel alto de energía a un nivel más bajo (spin paralelo al protón a spin antiparalelo) emite un fotón de longitud de onda 21.1cm, es decir ondas de radio.



15.2.4 Brillo Superficial y rotacion

- El perfil de **brillo superficial** de una galaxia brinda información acerca de la **distribución** de su **materia luminosa**. Las **curvas de rotación**, en cambio, brindan información acerca de la **distribución de materia** total, es decir luminosa y oscura.
- Al igual que para la Vía Láctea, las curvas de rotación de la mayoría de las galaxias revelan que existen grandes cantidades de materia oscura alrededor de las mismas.

15.2.5 Determinacion de Masas

- La distribución de la **masa** en las galaxias es una cantidad crucial, tanto para la cosmología como para las teorías del origen y evolución de las galaxias. Observacionalmente se determina a partir de las **velocidades** de las estrellas y el **gas** interestelar.
- Las **masas totales** de galaxias también se pueden derivar de sus **movimientos en cúmulos** de galaxias. Los resultados generalmente se dan en términos de la correspondiente relación masa-luminosidad M/L , utilizando la masa solar y la luminosidad como unidades.

Masas de las galaxias Elípticas

- Las masas de las **galaxias elípticas** se pueden obtener a partir de la **dispersión** de la velocidad estelar.
- El método se basa en el teorema del virial, que dice que en un sistema en equilibrio, la energía cinética T y la energía potencial U están relacionadas según la ecuación:

$$2T + U = 0$$

- Dado que las elípticas giran lentamente, la energía cinética de las estrellas se puede escribir:

$$T = Mv^2/2$$

- Donde M es la masa total de la galaxia y v el ancho de velocidad de las líneas espectrales. La energía potencial es:

$$U = -2GM^2/2R$$

Donde R es un radio promedio adecuado de la galaxia que se puede estimar o calcular a partir de la distribución de luz. Obtenemos entonces:

$$M = \frac{2v^2R}{G}$$

- La masa de la galaxia elíptica puede llegar a ser de: $10^{12} - 10^{13}M_{\odot}$

Masas de las galaxias Espirales

- Las masas de las **galaxias espirales** se obtienen a partir de su **curva de rotación** $v(R)$, que da la variación de su velocidad de rotación con el radio.
- Suponiendo que la mayor parte de la masa está en el bulbo casi esférico, la masa dentro del radio R, $M(R)$, se puede estimar a partir de la **tercera ley de Kepler**:

$$M(R) = \frac{Rv(R)^2}{G}$$

- Las partes mas externas no dependen de R.
- La masas de las galaxias espirales puede llegar a ser de: $10^{11} - 10^{12}M_{\odot}$

15.2.6 Relaciones de Escala

- Las **relaciones de escala** describen fuertes tendencias que se observan entre **propiedades físicas importantes** (como **masa**, **tamaño**, **luminosidad** y **colores**) de las galaxias. Tanto las galaxias de **tipo temprano** como las de **tipo tardío** exhiben relaciones de escala, aunque se utilizan relaciones diferentes para cada tipo.
- Entre las relaciones de escala para las galaxias de tipo tardío, la más importante es la relación Tully-Fisher. Esta relación, que puede derivarse del teorema del virial, relaciona la velocidad de rotación de la galaxia con su luminosidad, y se usa a menudo para determinar distancias en el Universo. Por lo tanto, proporciona un peldaño importante en la escalera de distancias.
- Hay una serie de relaciones de escala importantes para las galaxias de **tipo temprano**. Éstas incluyen:
 - La Relación Faber-Jackson (FJR): muestra una fuerte **correlación** entre las **masas** y **luminosidades** de las galaxias, con las galaxias más masivas siendo las más luminosas.
 - La Relación Color-Magnitud (CMR).
 - La relación de Kormendy: muestra una correlación entre los **radios efectivos** de las galaxias y sus **brillos superficiales** en ese radio.
 - El Plano Fundamental (FP): es un plano tridimensional que muestra fuertes correlaciones entre los **radios efectivos**, la **luminosidad** y las **dispersiones de velocidad** de las galaxias.

- La existencia de relaciones de escala que correlacionan las propiedades físicas de galaxias diferentes indica que los procesos de formación de todas las galaxias dentro de un tipo de galaxia en particular deben ser bastante similares. Por lo tanto, las relaciones proporcionan información sobre la formación y la evolución de las galaxias, y muchas también se utilizan para medir las distancias a las galaxias.

15.2.7 Tully - Fisher Relation - Spiral Galaxies

El siguiente grafico resume el concepto de relacion de Tully - Fisher:



Figure 4. La relacion de Tully-Fisher es una relacion entre la velocidad rotacional de una galaxia y su luminosidad.

En el grafico podemos ver que entre mayor sea la luminosidad de una galaxia, mayor sera su rotacion. En terminos de una ecuacion, la proporcionalidad puede escribirse como:

$$L \propto v_{\max}^{\alpha} \quad (4)$$

Donde α es aproximadamente igual a 4.

Concretamente la relacion de Tully-Fisher relaciona la luminosidad (o magnitud absoluta) con el maximo de su velocidad de rotacion, donde dicha velocidad de rotacion se obtiene con la linea de 21cm del Hidrogeno. Las galaxias mas brillantes rotan mas rapido.

La relacion de Tully Fisher, es valida solamente para galaxias espirales. Uno podria preguntarse porque la relacion no es viable para galaxias elipticas. Una respuesta puede ser que las galaxias elipticas no tienen una rotacion definida alrededor de un eje, que en el caso de las espirales seria el eje del disco.

Como utilizamos la relacion de Tully Fisher para determinar una distancia?



Figure 5. Con la ecuacion de la magnitud podemos conocer la distancia a partir de la luminosidad. Hay un error con la formula del grafico.

$$d = 10^{(m-M+5)/5}$$

Determinacion de la velocidad de Rotacion

Otra pregunta que podemos hacernos es como mediriamos la velocidad de rotacion? Para ello

utilizaríamos el Efecto Doppler.



Figure 6. Cierta parte de los cuerpos orbitantes en el anillo estaran viajando hacia nosotros, mientras que cierta parte de los objetos se estaran alejando de nosotros. Eso tendra un efecto en los patrones de luminosidad observados. Entonces para distintas secciones tendremos parte de la luz red-shifted (que se aleja) ligeramente, mientras que la otra parte tendra un blue-shifted (que se acerca).



Figure 7. La luz que se mueve hacia nosotros esta blue-shifted. El grafico muestra un mapa dopler de la galaxia M33. Puede verse claramente el patron de rotacion de la galaxia en sentido anti-horario.

Deacuerdo con el libro:

La medida de v_{\max} puede obtenerse de una curva de rotacion espacial bien resuelta. Para obtener este tipo de mediciones puede utilizarse optica espectroscopica para determinar $v_{\text{rot}}(\theta)$ o bien, para

galaxias relativamente cercanas, con espectroscopia resuelta de 21cm. Esto seria medir la linea HI con un ancho doppler de 21cm y que corresponde a $2v_{\text{max}}$.



Figure 8.

Tengamos en cuenta que la velocidad se determina a partir de la linea de 21[cm] del HI. Para entender esto consideremos la relacion siguiente:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{rest}}} \simeq \frac{v_r}{c} = \frac{V \sin\theta_i}{c}$$



Figure 9.

Masa en lugar de Luminosidad

En algunos casos , la masa se utiliza en lugar de la luminosidad para exhibir la relacion de tully-fisher. Para entender porque podemos hacer esto debemos tener en cuenta el teorema del Virial:

$$2K + U = 0$$

Si reemplazamos la energia cinetica y el potencial gravitatorio obtendremos:

$$2\left(\frac{1}{2}mv_{\max}^2\right) - \frac{GMm}{r} = 0$$

En esta expresion M , es la masa del Bulge, mientras que m es la masa del gas. Trabajando la ecuacion obtendremos:

$$\frac{v_{\max}^2 r}{G} = M$$

Esto ultimo nos arroja entonces la conclusion de que a mayores Masa (O luminosidades) obtendremos mayores velocidades.

Si avanzamos un poco mas reemplazando el brillo superficial como: $\langle I \rangle = \frac{L}{R^2}$

Notas Finales

La relacion de Tully Fisher puede variar segun la banda y el tipo de espiral.

15.2.8 Relacion de Faber-Jackson

Esta es una relacion para las galaxias elipticas e indica que la dispersion de la velocidad, σ_0 escala con la luminosidad.

$$L \propto \sigma_0^4$$

O bien puede escribirse como:

$$\log(\sigma_0) = -0.1 M_B + \text{const}$$

Aqui: M_B : masa del Bulge.

Sobre la dispersion de velocidades: (Wikipedia). *In astronomy, the velocity dispersion (σ) is the statistical dispersion of velocities about the mean velocity for a group of astronomical objects, such as an open cluster, globular cluster, galaxy, galaxy cluster, or supercluster. By measuring the radial velocities of the group's members through astronomical spectroscopy, the velocity dispersion of that group can be estimated and used to derive the group's mass from the virial theorem.[1] Radial velocity is found by measuring the Doppler width of spectral lines of a collection of objects; the more radial velocities one measures, the more accurately one knows their dispersion. A central velocity dispersion refers to the σ of the interior regions of an extended object, such as a galaxy or cluster.*

En wikipedia (Ingles) Teneis una derivacion teorica de esta relacion.

15.2.9 Plano Fundamental

Las galaxias elipticas yacen en un plano para las siguientes propiedades:

- Velocidad de dispersion: σ_0
- Radio efectivo: $\log(R_{\text{eff}})$
- Brillo Superficial: $\log(\langle \mu \rangle_e)$, $\langle \mu \rangle_e$: Brillo superficial promedio dentro de R .

La ecuacion de este plano seria la siguiente:

$$\log(R_e) = 0.36 \langle \mu \rangle_e + 1.4 \log \sigma_0 + \text{const}$$

Para entender un poco mejor esta relacion, hay que estudiar varias relaciones existentes entre varios parametros de las elipticas por separado.

Relacion Radio efectivo y brillo superficial

$$R_e = \langle I \rangle_e^{-0.83}$$

Donde $\langle I \rangle_e$: Brillo superficial a radio R_e .

Si utilizamos $L = 2\pi R_e^2 \langle I \rangle_e$ podemos terminar derivando que: $\langle I \rangle_e \propto L^{-1.5}$. Esta ultima relacion no dice que las elipticas con mayor brillo superficial tienen menor luminosidad o viceversa.

Relacion Faber Jackson

La anteriormente mencionada relacion de Faber Jackson vincula L con σ_0 . Si ahora consideramos que L y $\langle I \rangle_e$ estan relacionados (Ver arriba) entonces tenemos un relacionamiento entre $\langle I \rangle_e$, R_e y σ_0 . Estas 3 cantidades nos dan el plano fundamental.

15.2.10 Relacion $D_n - \sigma$

La relacion puede escribirse de la siguiente forma:

$$D_n \propto \sigma_0^{1.4} I_e^{0.05}$$

Aqui, las cantidades representan lo siguiente:

- D_n : Diametro medio de la elipse dentro de la cual el brillo superficial promedio I_n corresponde a un valor de 20.75 [mag/arcsec²] en la banda B.

16 Dudas Para resolver

- Que significa que una estrella sea vieja y pobre en metales? No deberia ser alto el contenido en metales de una estrella vieja? Se considera (Libro Schneider) metal todo elemento mas pesado que Hidrogeno. La formacion estelar deberia darse con este metodo ligero, entonces si me decis que la estrella es vieja y ademas pobre en metales, para mi es que tiene elementos ligeros y deberia haber star forming, a menos que tal vez como se espera su temperatura nunca alcance la necesaria para la formacion estelar.