

Astronomía Extragaláctica
Guía de Trabajos Prácticos - 2015

Sergio A. Cellone, Ileana Andruchow, Analía Smith Castelli

22 de octubre de 2015

Astronomía Extragaláctica – Práctica 1

Marco cosmológico - Ley de Hubble

Archivos auxiliares:

- Gunn-Oke.txt
- tabla-2MASS.txt

1. Encuentre la relación que vincula a la magnitud absoluta M de una galaxia con su magnitud aparente m y con el corrimiento al rojo z de su espectro. Grafique V contra $\log(z)$ para los datos de Gunn & Oke (1975), que corresponden a las galaxias más brillantes en cúmulos ricos de galaxias (archivo Gunn-Oke.txt), y utilice la expresión hallada antes para ajustar los puntos del diagrama, suponiendo que las magnitudes absolutas de todas las galaxias son aproximadamente iguales.

Realice el mismo tipo de gráfico para los datos obtenidos del catálogo 2MASS que se proporcionan en el archivo tabla-2MASS.txt. ¿Puede ajustarse una función similar en este caso? ¿Por qué? Comente.

Datos:

$$c = 2.99792 \times 10^5 \text{ km s}^{-1}$$
$$H_0 = 71 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

-
2. Una hipótesis que se usó alguna vez para intentar explicar la relación de Hubble es la hipótesis de la *luz cansada*, que sostiene que el Universo no se expande, sino que al atravesar el espacio los fotones pierden energía (por algún mecanismo desconocido), de acuerdo a:

$$\frac{dE}{dr} = -KE, \quad (1.1)$$

donde K es una constante. Muestre que esta hipótesis conduce a una relación entre el corrimiento al rojo y la distancia similar a la Ley de Hubble para $z \ll 1$.

¿Qué valor debe tener K para obtener una constante de Hubble $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$?

3. A partir de la expresión del factor de escala de un universo de Friedmann-Robertson-Walker:

$$R(t_e) = R(t_0) + (t_e - t_0) \frac{dR(t_0)}{dt} + \frac{1}{2} (t_e - t_0)^2 \frac{d^2 R(t_0)}{dt^2}, \quad (1.2)$$

y de las definiciones de la constante de Hubble y del parámetro de desaceleración:

$$H_0 \equiv H(t_0) = \frac{dR(t_0)}{dt} \frac{1}{R(t_0)} \quad (1.3)$$

$$q_0 \equiv - \frac{d^2 R(t_0)}{dt^2} \frac{1}{R(t_0) H_0^2}, \quad (1.4)$$

encuentre una expresión para el corrimiento al rojo z en función de H_0 , q_0 , y de la diferencia entre los tiempos de emisión y de observación ($t_e - t_0$);

Datos:

$$z = \frac{R(t_0)}{R(t_e)} - 1$$

4. Suponga que usted es un ser bidimensional, viviendo en la superficie de una esfera de radio R . Un objeto de ancho $ds \ll R$ se encuentra a una distancia r de usted (recuerde que todas las distancias se miden sobre la superficie de la esfera).
¿Qué tamaño angular $d\theta$ medirá para ese objeto?
Explique el comportamiento de $d\theta$ a medida que $r \rightarrow \pi R$.

5. Suponga que usted *sigue siendo* el ser bidimensional del Ej. 4, viviendo sobre la misma esfera de radio R . Muestre que si usted traza una circunferencia de radio r , el valor de su perímetro es:

$$C = 2\pi R \sin\left(\frac{r}{R}\right).$$

Suponga que la Tierra es una esfera perfecta de radio $R = 6371$ km. Si usted pudiera medir distancias con un error de ± 1 m, calcule el tamaño mínimo del círculo que debería dibujar sobre la superficie terrestre para convencerse de que la Tierra no es plana sino esférica.

6. En el espacio Euclídeo corriente, la distancia entre dos puntos, usando coordenadas cilíndricas (r, θ, z) es:

$$\Delta s^2 = \Delta r^2 + r^2 \Delta \theta^2 + \Delta z^2. \quad (1.5)$$

Si esos dos puntos yacen sobre la superficie de una esfera de radio R , vale

$$r^2 + z^2 = R^2. \quad (1.6)$$

Hallar la expresión de Δs^2 usando $\chi = r/R$. Comparar con la expresión de la métrica FRW y comentar.

7. A partir de las ecuaciones de Friedman para la tasa de expansión y la aceleración en un universo dominado por materia y constante cosmológica (es decir, despreciando radiación):

$$\left(\frac{dR(t)}{dt}\right)^2 = -kc^2 + \frac{8\pi G \rho(t_0)R(t_0)^3}{3R(t)} + \frac{\Lambda R(t)^2}{3}, \quad (1.7)$$

$$\frac{d^2R(t)}{dt^2} = -\frac{4\pi G \rho(t_0)R(t_0)^3}{3R(t)^2} + \frac{\Lambda R(t)}{3}, \quad (1.8)$$

- a) grafique en forma esquemática la evolución de $R(t)$ para $\Lambda < 0$, $\Lambda = 0$, y $\Lambda > 0$, considerando los 3 valores posibles del parámetro de curvatura ($k = 0, k \pm 1$) en cada caso;
 b) para el caso de constante cosmológica positiva ($\Lambda > 0$) y parámetro de curvatura $k = +1$, encuentre el valor de Λ requerido para que exista un radio mínimo $R_{\min} \neq 0$ a partir del cual el universo se empieza a expandir, y el valor de dicho radio mínimo.

8. En base a las ecuaciones 1.7 y 1.8 del ejercicio 7 encuentre los valores de la constante cosmológica (Λ) y del parámetro de curvatura (k) correspondientes a un universo estático. ¿Cuál es el valor de R para ese universo?

9. Calcule las velocidades del “flujo de Hubble” que corresponden a:

M31: $(m - M)_0 = 24.47$ mag

Cúmulo de Virgo $(m - M)_0 = 31.10$ mag

Cúmulo de Coma $(m - M)_0 = 35.06$ mag.

Compare con las dispersiones de velocidades radiales de las galaxias que se miden en grupos ($\sigma_{r,g} \sim 100 - 500 \text{ km s}^{-1}$) y en cúmulos de galaxias ($\sigma_{r,c} \sim 700 - 1200 \text{ km s}^{-1}$), y comente.

10. Utilizando la “calculadora cosmológica” provista por N. Wright¹ grafique la edad del Universo (t_e) en función del corrimiento al rojo (z). Adopte un modelo estándar: $H_0 = 71 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_M = 0.27$, $\Omega_\Lambda = 0.73$. Compare con la ecuación a 2^{do} orden:

$$t_0 - t_e = \frac{1}{H_0} \left[z - \left(1 + \frac{q_0}{2}\right) z^2 \right]. \quad (1.9)$$

¿Cuál era la edad del Universo, en función de su edad actual, para $z = 1$?

¹<http://www.astro.ucla.edu/~wright/CosmoCalc.html>

11. Para un espectro de cuerpo negro, el número de fotones con frecuencias entre ν y $\nu + d\nu$ en un volumen de espacio $V(t)$ a un tiempo cósmico t está dado por:

$$dN(t) = \frac{8\pi\nu^2 V(t) d\nu}{c^3 \left(e^{\frac{h\nu}{kT_r(t)}} - 1 \right)}.$$

Mostrar que a un tiempo cósmico posterior t' la distribución también corresponde a un cuerpo negro, aunque a una temperatura $T_r(t') < T_r(t)$.

Astronomía Extragaláctica – Práctica 2

Poblaciones estelares

Archivos auxiliares:

- Tiempos.dat
- B.dat, V.dat, I.dat, J.dat, Ks.dat
- z2whb.dat, zswhb.dat, zmw hb.dat
- Vega.Kurucz.dat

1. Suponga que usted ha adquirido un reactor de fusión hogareño tipo “*Mr. Fusion*”¹ y dispone de 100 g de hidrógeno como combustible. Considerando únicamente la reacción $H \rightarrow He$, y suponiendo que acopla el reactor a un generador eléctrico con un 10 % de eficiencia, calcule por cuánto tiempo dispondrá de energía eléctrica en su domicilio manteniendo su actual tasa promedio de consumo.

2. Haga un cuadro sinóptico o tabla que indique las principales etapas de la evolución estelar para distintos rangos de masa, resumiendo cuáles son las condiciones estructurales y de generación de energía en cada caso.

3. a) Estudie el comportamiento evolutivo de estrellas de distinta masa usando para eso el simulador *Digital Demo Room – Stellar Structure and Evolution Simulator* disponible en: <http://rainman.astro.illinois.edu/ddr/stellar/>. Utilizando nivel *Intermediate*, estudie la evolución de estrellas de $M = 0.8, 1$ y $5 M_{\odot}$ y metalicidad solar.

1) A partir de los valores que resultan de las simulaciones, estime la fracción de vida que transcurre cada estrella en cada una de las fases indicadas:

MS: Secuencia Principal

SGB: Rama de las Subgigantes

RGB: Rama de las Gigantes Rojas

HB: Rama Horizontal

AGB: Rama Asintótica de las Gigantes

¹Ver “*Volver al Futuro (Parte II)*”

- 2) Compare los tiempos correspondientes a cada estrella en las distintas etapas y comente al respecto.
 - 3) En particular, compare el tiempo de MS para la estrella de menor masa con la edad del Universo.
 - 4) Discuta para cuál de las estrellas el tiempo en la RGB es máximo, y por qué.
-

4. Dadas las tablas de Buzzoni (1989, ApJS, 71, 817) para modelos de poblaciones estelares simples (SSP), calcule los colores $B - V$, $V - I$, y $J - K_S$ correspondientes a poblaciones de metalicidades sub-solar (z2whb.dat), solar (zswhb.dat), y alta metalicidad (zmwhb.dat), en cada caso para 3 edades distintas: 12.5, 6, y 3 Gyr.

Para las bandas ópticas (B , V , I) use las respuestas de los filtros dadas por Bessell (1990, PASP, 102, 1181; tablas B.dat, V.dat, e I.dat), y para las infrarrojas use las del 2MASS (Cohen et al. 2003, AJ, 126, 1090; tablas J.dat y Ks.dat).

Obtenga los puntos de cero de los colores integrando el espectro de Vega (A0V) provisto por Kurucz (<http://kurucz.harvard.edu/stars/VEGA/>; tabla Vega.Kurucz.dat).

Ubique a las 9 poblaciones en un gráfico $B - V$ vs. $V - I$ y en un gráfico $B - V$ vs. $J - K_S$. Considerando que se trata de SSP de edades intermedias y viejas, responda:

- a) ¿Cuál es el color más sensible a la edad? Explique por qué.
 - b) ¿Cuál es el color más sensible a la metalicidad? Explique por qué.
 - c) ¿Cuál es el error mínimo en los colores $B - V$ y $V - I$ para poder discriminar entre una SSP de $t = 6$ Gyr con metalicidad sub-solar, y una SSP de $t = 3$ Gyr con alta metalicidad?
 - d) ¿Cuál es la combinación de colores más adecuada para romper la degeneración edad-metalicidad?
-

Astronomía Extragaláctica – Práctica 3

Propiedades generales de las galaxias

Archivos auxiliares:

1. a) Verifique gráficamente la Ley de Wien para un cuerpo negro a $T = 5800$ K (temperatura de la superficie del Sol). Para ello, grafique la expresión de la Ley de Planck (energía por unidad de tiempo, área, SR y longitud de onda)

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (3.1)$$

para un rango adecuado de λ . Indique en qué zona (color) del espectro electromagnético cae el máximo de la distribución.

- b) Obtenga la expresión equivalente de la Ley de Planck para B_{ν} (energía por unidad de tiempo, área, SR y frecuencia) y grafique en función de ν para la misma temperatura que en el punto **1a**. ¿A qué región espectral corresponde el máximo en este caso?
- c) Comente sobre la aparente discrepancia entre **1a** y **1b**.
- d) Grafique las dos formas de la *distribución espectral de energía* (SED) correspondientes a una planckeana: λB_{λ} vs. $\log(\lambda)$, y νB_{ν} vs. $\log(\nu)$. Verifique que la forma de ambas gráficas es similar, y que el máximo se produce para la misma frecuencia – longitud de onda.
- e) Considere ahora un objeto cuya emisión se puede ajustar mediante una ley de potencias:

$$F_{\nu} = k \nu^{-\alpha}, \quad (3.2)$$

donde k es una constante y $\alpha > 0$ es el índice espectral.

Obtenga la expresión para F_{λ} y grafique para $k = 1$, $\alpha = 2$ (use escala logarítmica para el eje de ordenadas).

- f) Obtenga las expresiones para la SED correspondientes al caso del punto **1e**. Indique cómo son las gráficas que se obtienen para $\log(\lambda F_{\lambda})$ vs. $\log(\lambda)$, y para $\log(\nu F_{\nu})$ vs. $\log(\nu)$.

-
2. En una galaxia a distancia d Mpc, ¿cuál sería la magnitud aparente B de una estrella similar al Sol?

Muestre que para esa galaxia, $1''$ corresponde a $5d$ pc, y que por lo tanto el brillo superficial $\mu_B = 27$ mag arcsec $^{-2}$ equivale a una densidad superficial de $1 \mathcal{L}_{\odot}$ pc $^{-2}$.

Datos:
 $M_{\odot(B)} = 5.48$

3. La densidad de estrellas de tipo s en una galaxia espiral puede representarse en coordenadas cilíndricas galactocéntricas con una doble exponencial:

$$n(R, z, s) = n(0, 0, s) e^{-\frac{R}{r_0(s)}} e^{-\frac{|z|}{h_z(s)}}, \quad (3.3)$$

donde r_0 es la *longitud de escala* y h_z es la *altura de escala*.

Integrado la ecuación 3.3, muestre que a un radio R la densidad superficial de estrellas de tipo S es

$$\sigma(R, s) = 2n(0, 0, s) h_z(s) e^{-\frac{R}{r_0(s)}}.$$

Si cada estrella tiene luminosidad $\mathcal{L}(s)$, el brillo superficial es $I(R, s) = \mathcal{L}(s) \sigma(R, s)$. Suponiendo que tanto r_0 como h_z son iguales para todos los tipos de estrellas, muestre que que la luminosidad total del disco es $\mathcal{L}_D = 2\pi I_0 r_0^2$, donde $I_0 = I(R = 0)$.

Para la Vía Láctea, considerando $\mathcal{L}_D = 1.5 \times 10^{10} \mathcal{L}_{\odot}$ en la banda V y $r_0 = 3$ kpc, muestre que el brillo superficial del disco en los alrededores del Sol ($R = R_0 = 8$ kpc) es $I(R_0) \sim 18 \mathcal{L}_{\odot} \text{pc}^{-2}$.

4. El perfil de brillo en la banda I del disco de la galaxia espiral NGC 7331 puede ajustarse con una exponencial de brillo superficial central $\mu_{0(I)} = 19.4 \text{ mag arcsec}^{-2}$, mientras que el brillo superficial central medido sobre la imagen es $\mu_I(0) = 15.0 \text{ mag arcsec}^{-2}$. En forma similar a lo hecho en el Ej. 2, calcular las densidades superficiales (en $\mathcal{L}_{\odot} \text{pc}^{-2}$) en las regiones centrales del disco y del bulbo de esta galaxia. Ídem para la zona externa del disco ($\mu_I = 25.0 \text{ mag arcsec}^{-2}$). Comparar los resultados entre sí, y comentar.

Datos:
 $M_{I\odot} = +4.08$

5. A partir del perfil de brillo superficial de una galaxia en banda- V , se han determinado su radio efectivo r_e y un cierto radio isofotal r_t que, con buena aproximación, puede considerarse que encierra el flujo total de la galaxia. Contando también con el perfil en banda- I , se han medido los colores $(V - I)_e$ y $(V - I)_t$, usando diafragmas de radios r_e y r_t , respectivamente. En función de este par de colores, obtenga la expresión para el gradiente de color $\Delta(V - I) = (V - I)_e - (V - I)_{\text{out}}$, donde $(V - I)_{\text{out}}$ es el color medido en un anillo de radio interno r_e y radio externo r_t .

6. Considere una galaxia cuyo perfil de brillo se ajusta mediante una ley exponencial, siendo $r_e(V)$ el radio efectivo correspondiente al perfil en banda V . Si el color $(V - I)$ medido a $r_1 = 2 r_e(V)$ es 0.27 mag más azul que el color central, obtenga la relación entre las longitudes de escala correspondientes a los perfiles V e I .

7. Obtenga la expresión del flujo integrado para una galaxia cuyo perfil de brillo se ajusta con la ley de Sérsic:

$$I(r) = I_e \exp \left\{ -b_n \left[\left(\frac{r}{r_e} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] \right\}. \quad (3.4)$$

Para el caso particular $n = 1$ (ley exponencial) compare el resultado con lo obtenido en el Ej. 3.

Datos:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt$$

8. Para una galaxia cuyo perfil de brillo se ajusta con la ley de Sérsic, obtenga la expresión del flujo integrado hasta un dado radio r .
A partir del resultado, y usando la definición de radio efectivo, obtenga la relación que vincula a los parámetros n y b_n .

Datos:

$$\gamma(a, z) = \int_0^z e^{-t} t^{a-1} dt$$

9. Dada la *función de Schechter*:

$$\Phi(\mathcal{L}) \Delta \mathcal{L} = n_{\star} \left(\frac{\mathcal{L}}{\mathcal{L}^{\star}} \right)^{\alpha} e^{-\frac{\mathcal{L}}{\mathcal{L}^{\star}}} \frac{\Delta \mathcal{L}}{\mathcal{L}^{\star}}, \quad (3.5)$$

generalmente usada para ajustar la función de luminosidad de galaxias:

- Muestre que la densidad de galaxias tiende a cero para $\mathcal{L} \gg \mathcal{L}^{\star}$, mientras que para galaxias de baja \mathcal{L} la densidad numérica crece indefinidamente si $\alpha \simeq -1$, como indican las observaciones.
- Calcule la densidad de luminosidad integrada para $\alpha < 0$, y su valor particular para $\alpha = -1$. Comente qué se esperaría si $\alpha \gtrsim -2$.
- A partir de la Ec. 3.5 obtenga la expresión de la función de luminosidad en magnitudes.

Astronomía Extragaláctica – Práctica 4

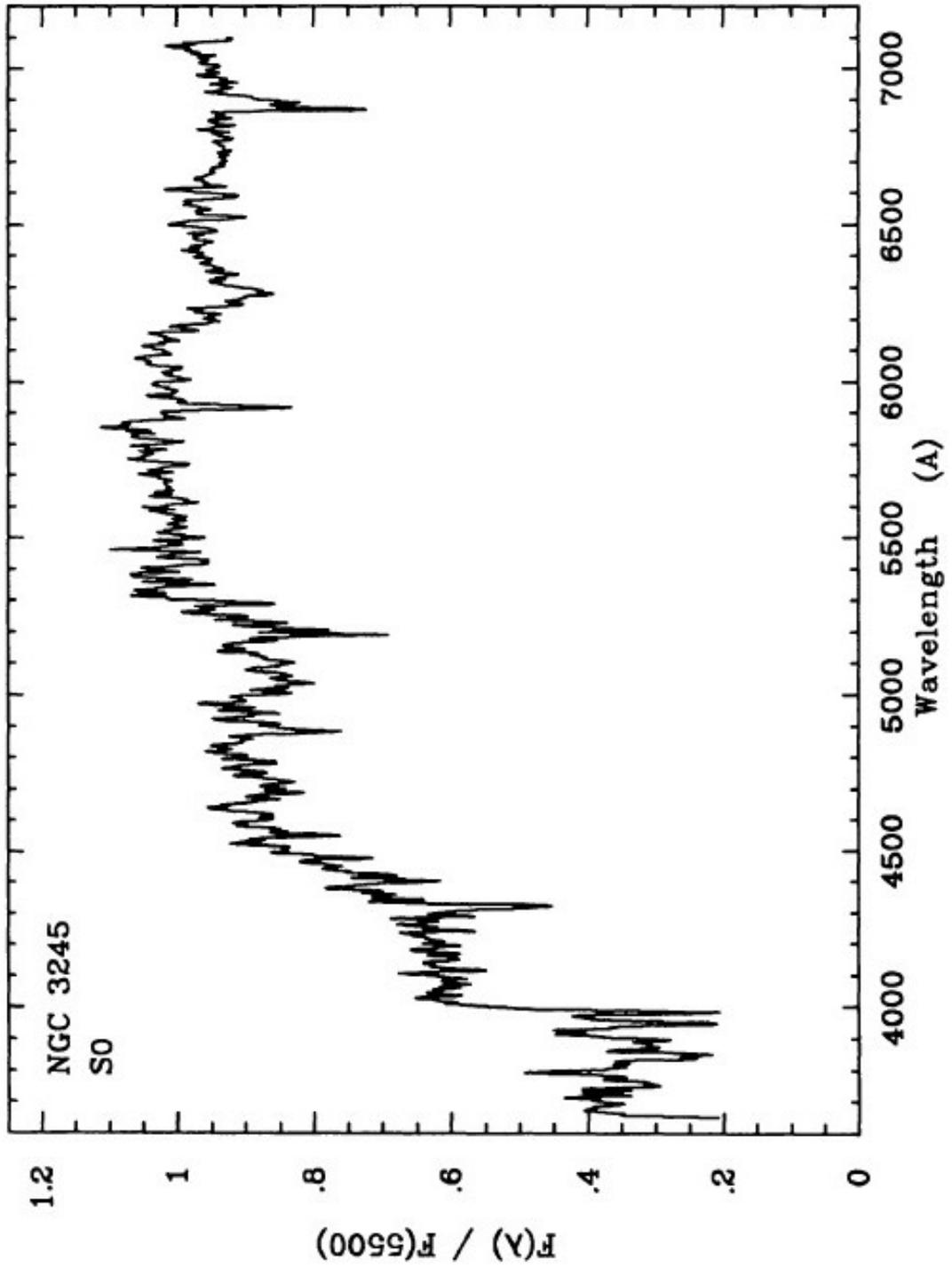
Galaxias espirales

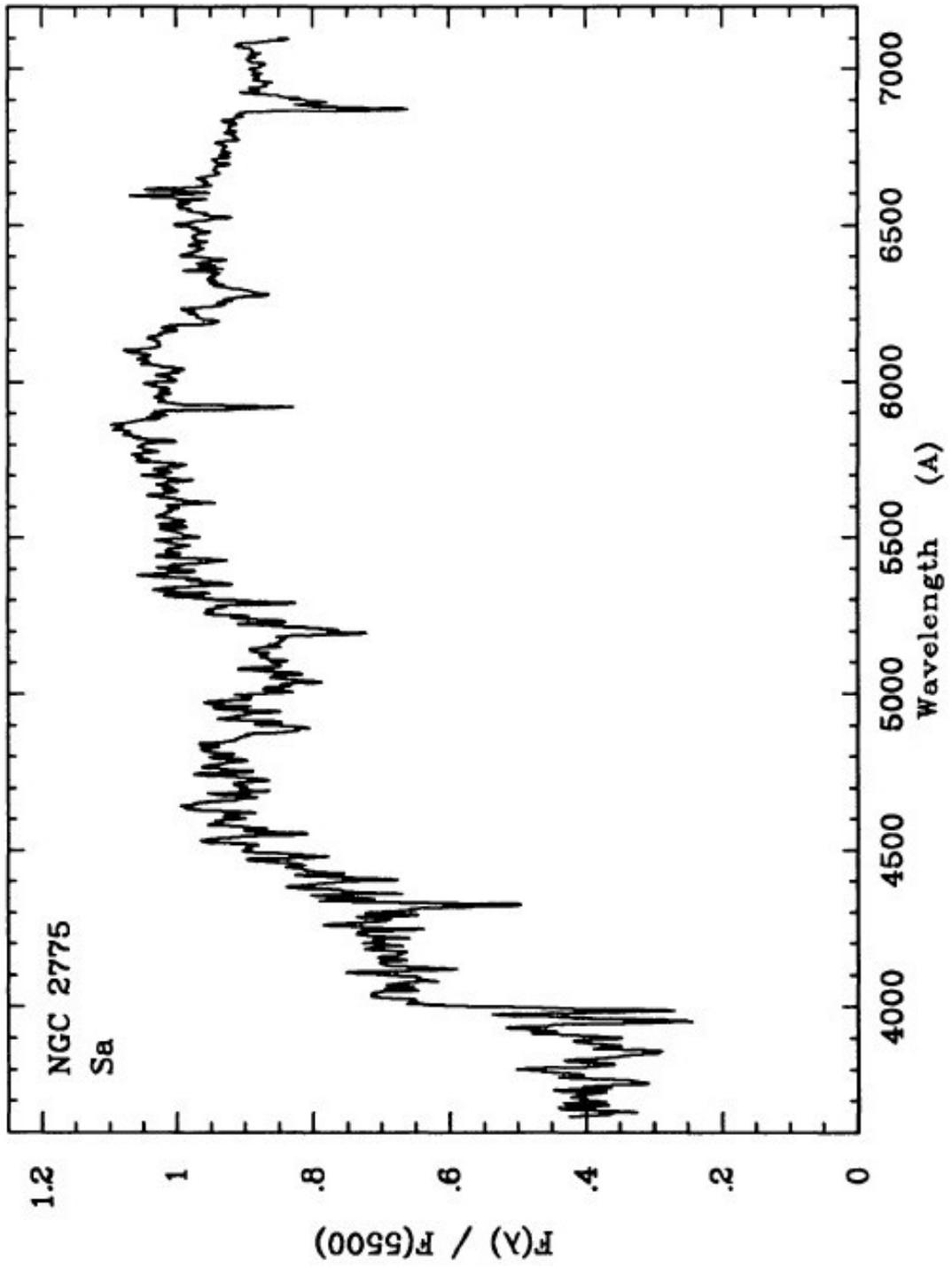
Archivos auxiliares: (No se requieren.)

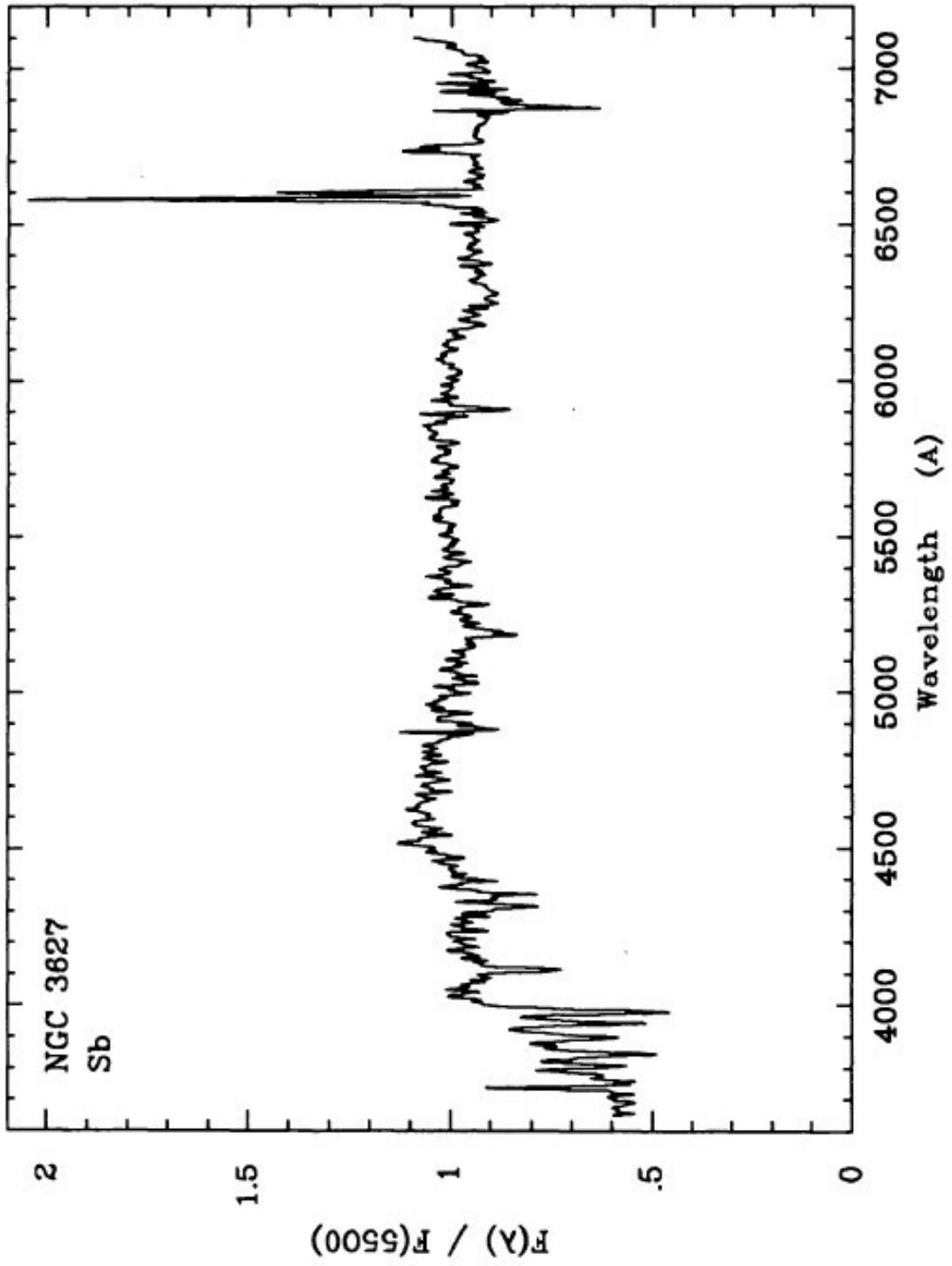
1. Utilizando las tablas del Apéndice C del apunte de la materia, identifique las líneas de absorción y de emisión presentes en los espectros de las figuras.

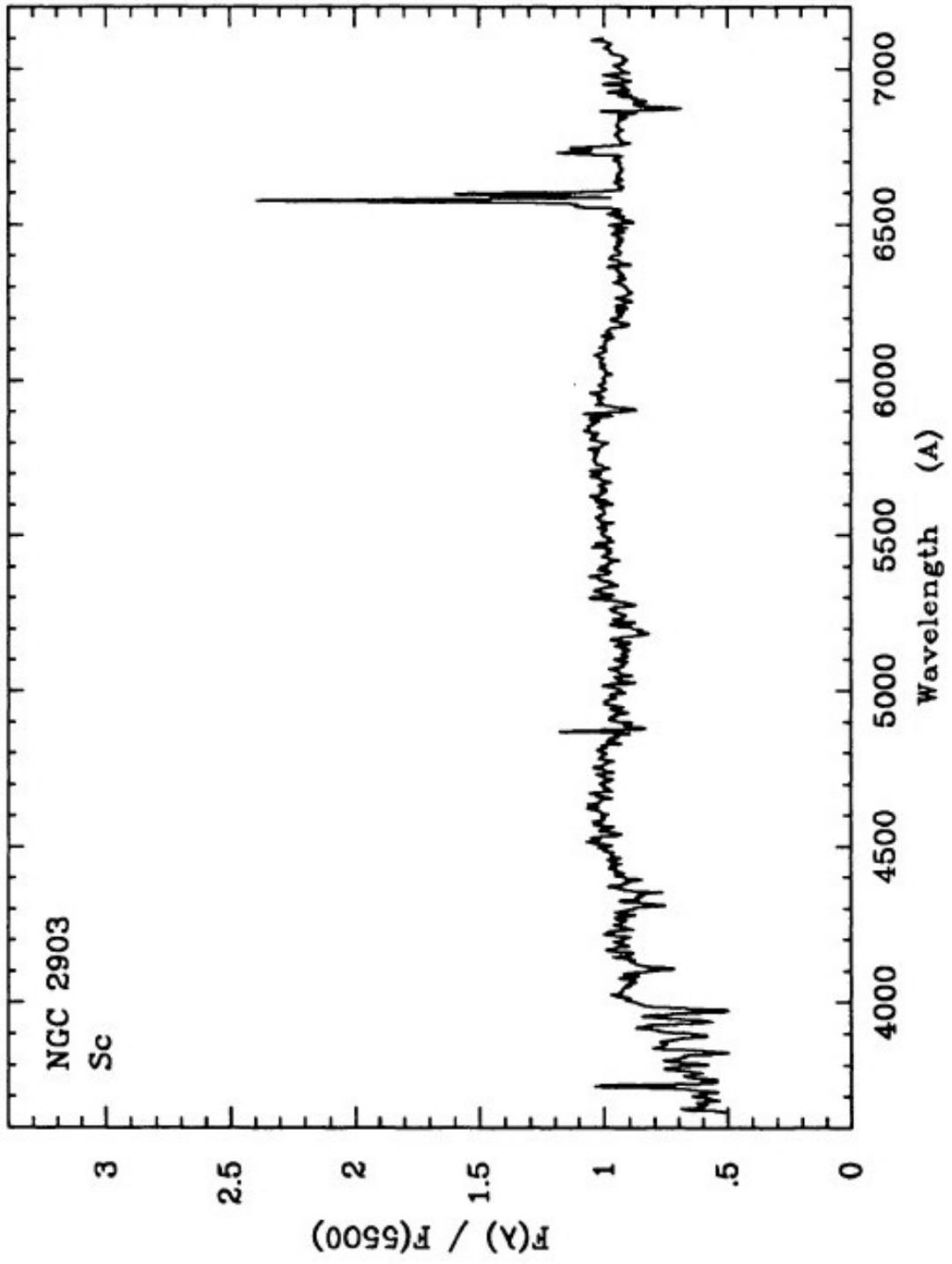
Comente:

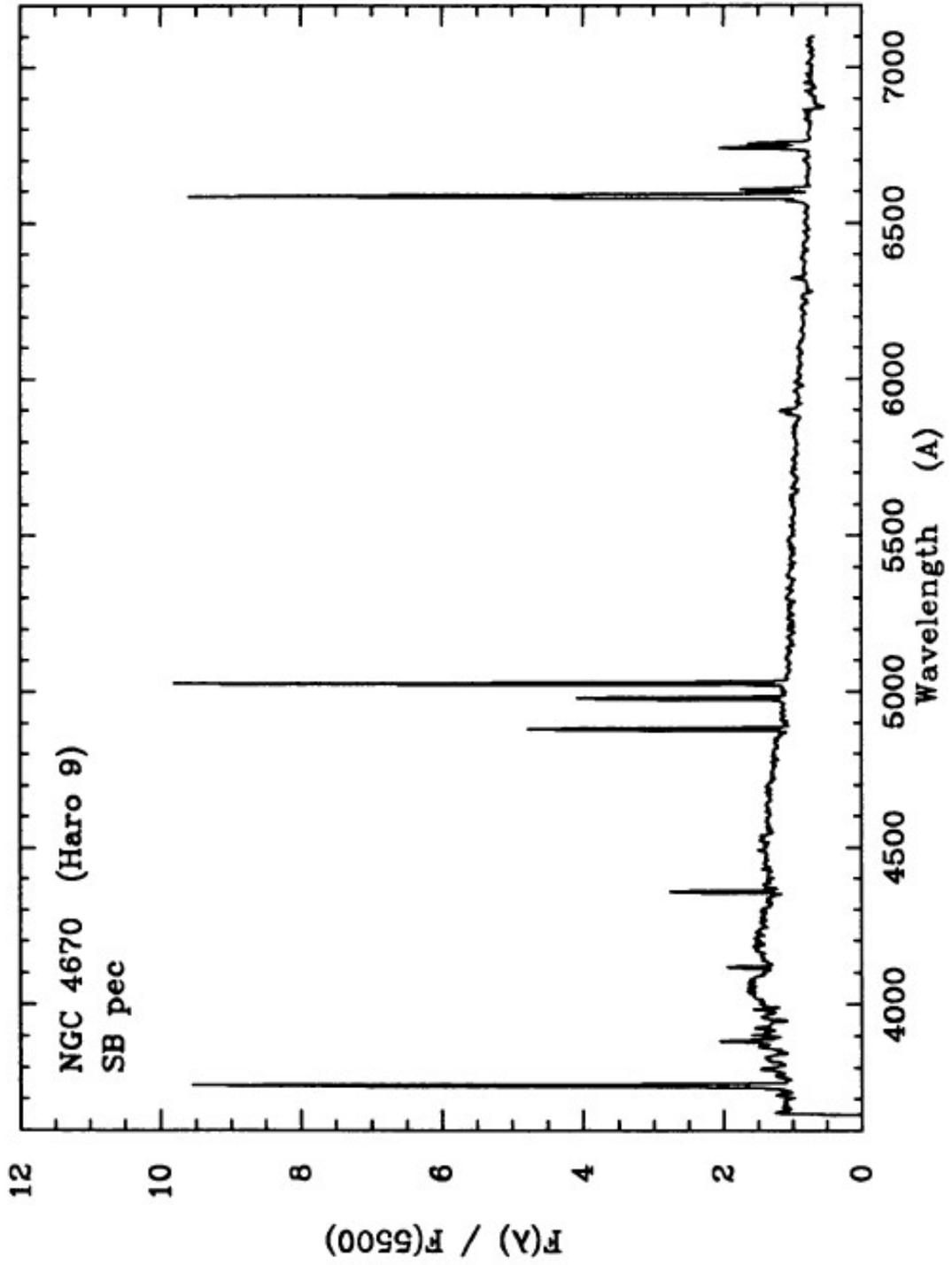
- a) ¿Por qué, en las galaxias Sb y Sc, la línea $H\beta$ está presente tanto en absorción como en emisión? Compare los anchos de la absorción y la emisión, y comente.
- b) Suponiendo que obtiene observaciones espectroscópicas de una muestra de galaxias lejanas, con el mismo tiempo de integración para cada galaxia, ¿qué tipo de galaxias será más favorable para determinar su corrimiento al rojo?











2. Considere la distribución esférica de densidad ρ_H (“halo oscuro”) dada por:

$$4\pi G \rho_H = \frac{v_H^2}{r^2 + a_H^2}$$

donde v_H y a_H son constantes.

¿Cuál es la masa $M(r)$ contenida dentro del radio r ? Use la ecuación de la velocidad circular para mostrar que la velocidad en función del radio es:

$$v^2(r) = v_H^2 \left[1 - \frac{a_H}{r} \arctan\left(\frac{r}{a_H}\right) \right] \quad (4.1)$$

Grafique la curva de rotación dada por la Ec. 4.1.

3. Considere que los discos estelares de las galaxias S se ajustan con una ley exponencial:

$$I_D(r) = I_0 e^{-\left(\frac{r}{r_0}\right)} \quad (4.2)$$

donde I_0 es la intensidad central y r_0 es la longitud de escala.

Obtenga las expresiones que vinculan al radio isofotal r_{iso} con el brillo superficial central (μ_0 en mag arcsec^{-2}) y con la magnitud aparente integrada m_T .

En un gráfico r_{iso} contra r_0 dibuje las curvas correspondientes a discos con:

- $\mu_0 = \text{constante}$
- $m_T = \text{constante}$

para un rango de valores de μ_0 y de m_T , y adoptando para ello una isofota $\mu = 24 \text{ mag arcsec}^{-2}$. Obtenga analíticamente el valor de μ_0 que maximiza el radio isofotal para una dada magnitud integrada, y compare con el gráfico.

Comente sobre las características de discos con radios isofotales menores que el máximo correspondiente a su magnitud integrada, y sobre posibles efectos de selección involucrados.

4. A partir de la curva de rotación dada por la Ec. 4.1 dibuje el *diagrama de araña* de las velocidades radiales para un disco observado con una inclinación $i = 30^\circ$, con contornos para $v_{\text{rad}} = \pm 0.2, \pm 0.4, \pm 0.6, \text{ y } \pm 0.8 v_H \text{ sen}(i)$.
-

5. Despreciando la contribución del bulbo, use la ecuación de la velocidad circular para explicar por qué se esperaría que la masa M de una galaxia espiral sea aproximadamente:

$$M \propto v_{\text{max}}^2 r_0.$$

A partir de la expresión de la ley exponencial, muestre que $\mathcal{L} = 2\pi I_0 r_0^2$, y que por lo tanto suponiendo que la relación M/\mathcal{L} y el brillo superficial central I_0 son constantes, se deduce la relación de Tully-Fisher: $\mathcal{L} \propto v_{\text{max}}^4$.

Para galaxias LSB no vale la ley de Freeman ($\mu_{0(B)} \approx 21.7 \text{ mag arcsec}^{-2}$), sino que tienen I_0 menores. Dado que estas galaxias cumplen la misma relación de Tully-Fisher, muestre que sus relaciones M/\mathcal{L} deben ser mayores que para galaxias de disco “normales”.

6. Mostrar que si el “ángulo de ataque” (*pitch angle*), i se mantiene constante, la expresión:

$$\cos \{m [\phi + f(R, t)]\} = 1,$$

donde

$$\frac{1}{\tan i} = \left| R \frac{\partial \phi}{\partial R} \right| = \left| R \frac{\partial f}{\partial R} \right|$$

es una espiral logarítmica, con $f(R, t) \tan i = \ln R + k$.

Grafique para distintos valores de m e i , y muestre que para ϕ fijo se cruzan $m/(2\pi \tan i)$ brazos espirales al aumentar R en un factor e .

Astronomía Extragaláctica – Práctica 5

Galaxias elípticas

1. Sabiendo que el brillo superficial central medido en la banda V para la galaxia cD NGC 1399 es $\mu_{0,V} \approx 16 \text{ mag arcsec}^{-2}$, calcule la densidad superficial de luminosidad correspondiente $\Sigma_{0,V}$ (en $\mathcal{L}_{\odot} \text{ pc}^{-2}$). Compare con la galaxia elíptica compacta M 32 ($\mu_{0,V} \approx 11 \text{ mag arcsec}^{-2}$) y con los valores obtenidos para el disco y el bulbo de una galaxia espiral en la Práctica 3.

Datos: $M_{\odot(V)} = 4.83$

-
2. Si se ajusta una isofota con una elipse descrita por la ecuación:

$$x = a \cos t ; \quad y = b \sin t \quad (5.1)$$

los residuos entre la elipse ajustada y la isofota, medidos en dirección radial, pueden describirse según la expresión:

$$\Delta r(t) \simeq \sum_{k \geq 3} a_k \cos(kt) + b_k \sin(kt). \quad (5.2)$$

Muestre que los coeficientes a_k y b_k con $k = 0, \dots, 2$ deberían anularse al hacer el ajuste. Discuta a qué tipo de distorsiones corresponde cada uno de los coeficientes a_k y b_k , con $k = 3$ y $k = 4$. Grafique para $k = 1, \dots, 4$. Para el caso de a_4 considere coeficientes positivos y negativos ($a_4 > 0$ y $a_4 < 0$).

Sugerencias:

- Grafique una elipse con razón de semiejes entre 0.4 y 0.6
- Para una mejor visualización considere coeficientes a_k y b_k del orden del 2% al 5% del valor adoptado para el semieje mayor a .

3. Utilice el teorema del virial para encontrar la relación entre la masa, el radio efectivo, y la dispersión de velocidades de una galaxia E. Obtenga a partir de allí una expresión aproximada a la que describe el “Plano Fundamental” de las galaxias elípticas. Comente sobre las diferencias entre los coeficientes hallados de esta forma y los que surgen del ajuste a las observaciones.

4. Partiendo de la relación entre la masa, el radio efectivo, y la dispersión de velocidades para las galaxias E obtenida en el ejercicio 3, y usando el resultado del ejercicio 7 de la práctica 3, muestre que, si el parámetro de Sérsic (n) no cambia mucho para distintas galaxias, entonces $\mathcal{L} \propto I_e r_e^2$.
Con esto, muestre que si para las galaxias E se puede aceptar además que I_e es aproximadamente constante, se obtiene la relación de Faber-Jackson.
Comentar sobre la validez de las suposiciones para distintos tipos de galaxias elípticas.

5. En el halo de una galaxia E, el gas tiene en promedio una dispersión de velocidad similar a las estrellas. La energía cinética de una masa de gas m será: $\mathcal{T} \approx \frac{3}{2} m \sigma_v^2$. Si el gas es básicamente H ionizado, muestre que la temperatura puede estimarse como:

$$T \approx 6 \times 10^6 \left(\frac{\sigma_v}{300 \text{ km s}^{-1}} \right)^2 \text{ K.}$$

Datos:

$$m_p = 1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$k = 1.3807 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$$

6. Estudie el comportamiento de colisiones de galaxias utilizando el *Galaxy Crash*¹, una herramienta on-line en Java interactivo. *Galaxy Crash* es parte del *JavaLab*². Para eso, ingrese a la página web, y abra la pestaña *applet*. El manejo de los controles de la simulación se describe en la pestaña *Controls*. Para todos los casos que se piden a continuación, describa la forma final obtenida, el tiempo que tarda en llegar a ese resultado (tenga en cuenta la edad del Universo) y las distancias relativas a las que quedan las galaxias. Comente las diferencias que se observan al cambiar los parámetros.

- Dejar la inclinación y el ángulo de giro (respecto al plano orbital) de ambas galaxias en 0 ($\theta_{\text{rojo}} = \theta_{\text{verde}} = 0$, $\phi_{\text{rojo}} = \phi_{\text{verde}} = 0$), masas iguales, número de estrellas en 2000 y menor distancia orbital en 10.
- Repetir la simulación anterior, pero considerando fricción dinámica.
- Repetir 6a) y 6b) cambiando la relación de masas.
- Repetir 6a) y 6b) cambiando las inclinaciones de las galaxias.

¹<http://burro.astr.cwru.edu/JavaLab/GalCrashWeb/main.html>

²<http://burro.astr.cwru.edu/JavaLab/>

- e) Modificar el periastro de manera que el resultado final sea una fusión (“*merger*”) de las dos galaxias. ¿Qué sucede con el *merger* al cambiar la relación entre las masas?
 - f) ¿Cómo afecta a las simulaciones anteriores el hecho de cambiar el número de estrellas?
 - g) Busque los parámetros adecuados que resultan en alguno de los casos de galaxias reales (por ejemplo, *Antenæ* o *Mice*). En cada caso, observe el tiempo que debería transcurrir para obtener el resultado final.
-

7. De igual manera que en el ejercicio anterior, estudie ahora el comportamiento de las galaxias satélite. Para esto use la herramienta *Cannibal*³. Esta aplicación Java es también parte del *Java-Lab*. Nuevamente, para todos los casos que se piden a continuación, describa el resultado final, el tiempo que tarda en llegar a ese resultado y, en este caso, el tipo de órbita que sigue el satélite. Comente las diferencias que se observan al cambiar los parámetros.

- a) Comience corriendo los parámetros por defecto. ¿Cuánto tiempo tarda el satélite en caer al centro de la galaxia? ¿Cuánta masa pierde en el proceso?
 - b) Repita el paso anterior modificando primero la masa del satélite y luego el radio del mismo.
 - c) Cambie los elementos orbitales (plantee orbitas circulares, elongadas, inclinación nula, etc.).
-

³<http://burro.astr.cwru.edu/JavaLab/cannibal/CannibalMain.html>

Astronomía Extragaláctica – Práctica 6

Galaxias peculiares y activas

1. Un AGN ubicado a 50 Mpc tiene un tamaño aparente menor a 0.1 arcsec en una imagen óptica tomada con el Hubble Space Telescope. Al mismo AGN se le detectó una variabilidad en el rango del óptico en una escala temporal de una semana.

Calcule el límite superior para el tamaño de la región emisora usando

- a) la medición del tamaño angular.
- b) la detección de variabilidad.

Comente.

2. Estime la luminosidad bolométrica de un AGN que se encuentra a una distancia de 200 Mpc y tiene la magnitud aparente de una galaxia normal como la Vía Láctea si estuviera ubicada a una distancia de 100 Mpc. Suponga que 1/5 de la energía del AGN es radiada en longitudes de onda del óptico.
-

3. Suponga que una galaxia tiene una densidad de flujo espectral F_λ de

- $10^{-27} \text{ W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ a $\lambda = 500 \text{ nm}$
- $10^{-28} \text{ W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ a $\lambda = 5 \mu\text{m}$
- $10^{-28} \text{ W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ a $\lambda = 50 \mu\text{m}$.

De acuerdo a la distribución espectral de energía (SED), estime de qué tipo de galaxia se podría tratar. Comente.

Nota:

- La energía emitida en cada banda se puede estimar calculando λF_λ .
-

4. Estime la tasa de acreción hacia un agujero negro que es necesaria para obtener la luminosidad del núcleo de una galaxia activa de la clase Seyfert, el cual tiene una luminosidad del doble que la de la Vía Láctea. Exprese el resultado en masas solares por año. Suponiendo que la acreción no supera la tasa de Eddington, obtenga una cota para la masa del SMBH central.

Datos:

$\mathcal{L}_{\text{bol}, MW} \approx 2 \times 10^{10} \mathcal{L}_{\odot}$

5. a) Muestre que el coeficiente de Gini, utilizado para cuantificar la distribución de las intensidades de los pixeles en la imagen de una galaxia:

$$G = \frac{1}{2\bar{X}n(n-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |X_i - X_j|, \quad (6.1)$$

puede calcularse, si previamente se ordenan los pixeles en valor creciente, mediante la expresión:

$$G = \frac{1}{\bar{X}n(n-1)} \sum_{i=1}^n (2i - n - 1) X_i. \quad (6.2)$$

En ambos casos n es el número total de pixeles considerados, los X_i son sus valores individuales de intensidad, y \bar{X} es el valor medio de la misma.

Discuta las ventajas de la expresión 6.2 en términos de mayor eficiencia computacional.

- b) Muestre que $G = 1$ cuando todo el flujo se concentra en un solo pixel.

6. Se ha obtenido una curva de luz para un blazar a $z = 0.538$, hallándose que el mismo cambió su magnitud aparente entre $R_1 = 15.3$ y $R_2 = 15.4$ en un lapso de 6 h. Sabiendo que para el jet de este objeto se ha determinado un ángulo con la visual $\phi = 3^\circ$ y se ha estimado un factor de Lorentz $\Gamma \approx 13$, obtenga la escala temporal de variabilidad Δt en el marco de referencia de la fuente.

7. a) La Fig. 6.1 muestra que la SED del blazar PKS 2155-304 puede ajustarse razonablemente bien por una ley de potencias entre $\sim 10^9$ y 10^{14} Hz. Obtenga gráficamente el valor aproximado del índice espectral α que corresponde a dicha ley de potencias.
- b) En el rango óptico, se han medido las siguientes magnitudes: $B = 13.45$, $R = 12.83$ para el mismo blazar (Bertone et al. 2000, A&A, 356, 1). Suponiendo que en este rango el espectro también sigue aproximadamente una ley de potencias, calcule el correspondiente índice espectral. Para ello, corrija por enrojecimiento Galáctico usando las tablas de Schlegel et al. (1998, ApJ, 500, 525), y luego utilice los puntos de cero para el sistema de Johnson-Cousins provistos por Bessell (1979, PASP, 91, 589).

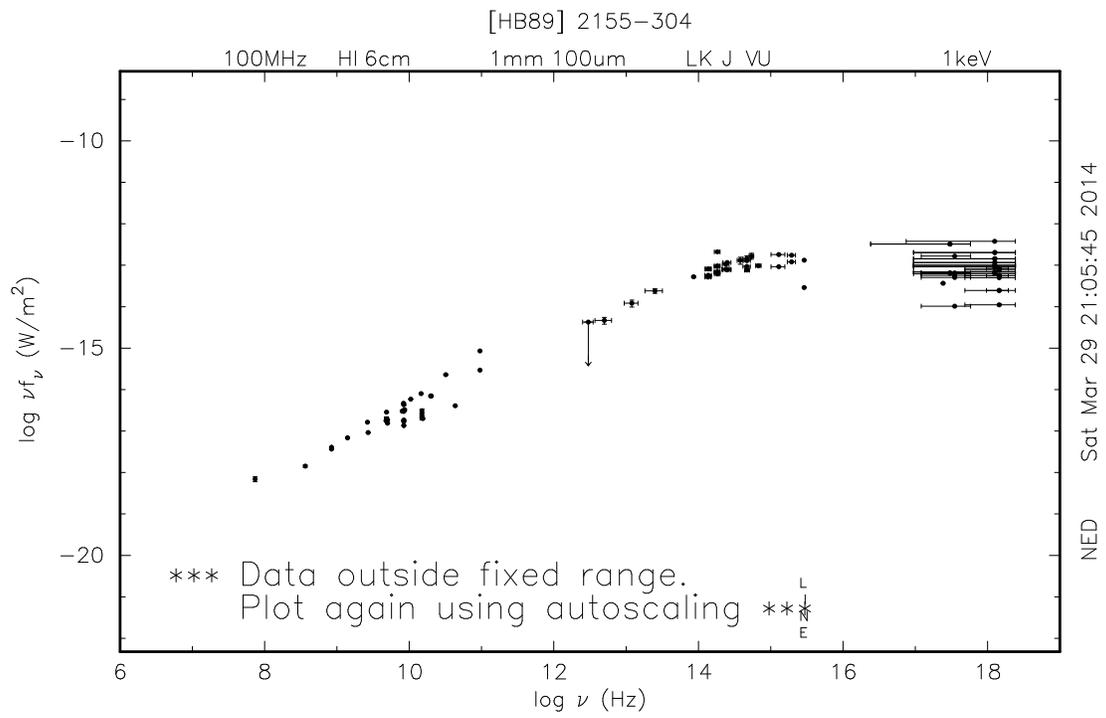


Figura 6.1: SED del blazar PKS 2155-304, obtenida de NED (<http://ned.ipac.caltech.edu/>)

Astronomía Extragaláctica – Laboratorio A

Fotometría de galaxias - SExtractor

Archivos auxiliares:

- SExtractor.tar:
 - default.conv
 - default.nnw
 - default.param
 - default.sex
 - gauss_15_17x17.conv
 - gauss_5_0_9x9.conv
 - manual_SExtractor.pdf
- Datos.tar:
 - abell1689.jpg
 - smrgS20030301S0141_add.fits
 - smrgS20030301S0141_add_trn.fits
 - smrgS20030301S0149_add.fits

Objeto particular del estudio: Abell 1689 es uno de los cúmulos de galaxias más masivos en el Universo, ubicado a unos 670 Mpc de la Vía Láctea, hacia la constelación de Virgo. El mismo ha sido ampliamente estudiado debido a que actúa como una intensa lente gravitacional que amplía las imágenes de galaxias mucho más lejanas. Dada su distancia y número de miembros, este cúmulo resulta ser muy atractivo para experimentar con programas que permitan obtener fotometría automática de galaxias.

Material observacional: En este laboratorio se utilizarán datos obtenidos con el instrumento Gemini Multi-Object Spectrograph (GMOS) montado en el telescopio Gemini Sur. Los mismos están constituidos por una serie de imágenes en los filtros g' (g_G0325) y r' (r_G0326), las cuales forman parte de una verificación instrumental realizada en 2003, y que se encuentran disponibles en la base de datos del Observatorio Gemini, *GEMINI Science Archive (GSA)*¹ asociadas al programa GS-2003A-SV-217. La cátedra ha realizado la reducción del conjunto de datos, y se han generado imágenes finales que son el resultado de combinar ocho exposiciones individuales de 180.4 s cada una.

¹<http://cadwww.dao.nrc.ca/gsa/>

Objetivo: Utilizar el software SExtractor (*astronomical Source Extractor*), desarrollado por Emmanuel Bertin (Bertin & Arnouts, 1996), para generar un catálogo de los objetos presentes en dichas imágenes, testeando el efecto de distintos parámetros. En base a los resultados, se construirán diagramas color-magnitud de los objetos detectados en el campo.

1. Para cada una de las imágenes, obtenga la ganancia, el binnedo utilizado, la escala de las mismas, y el filtro correspondiente. Para la obtención de estos parámetros, proceda de la siguiente manera:

- a) Ingrese a IRAF tipeando `ec1` desde su directorio *home* en una *xgterm*.
- b) Utilice la tarea `hedit` (la misma se encuentra dentro del paquete `images.imutil`) de la siguiente manera:
`hedit *.fits[0] gain,ccdsum,pixscale,filter2`

NOTA: la instrucción anterior deberá ejecutarse sobre las imágenes `smrgS20030301S0141_add.fits` y `smrgS20030301S0149_add.fits`. Recuerde, además, que las imágenes de GMOS, una vez reducidas, se encuentran en unidades de e^- .

2. Obtenga un valor estimativo del nivel de saturación y del *seeing* de cada imagen. Para ello, proceda de la siguiente manera:

- a) Dentro del paquete IRAF, ingrese en el subpaquete `gemini.gmos`.
- b) Tipee `set stdimage=imtgmos2`.
- c) Despliegue cada imagen utilizando la tarea `gdisplay`.
- d) Para obtener su nivel de saturación, con la tarea `imexa`, opción `r`, examine varias estrellas saturadas presentes en el campo. Establezca un valor representativo de dicho nivel observando la meseta que da el valor máximo de cuentas para las estrellas examinadas (Figura A.1).
- e) Para obtener un valor del *seeing* examine de la misma manera varias estrellas no saturadas del campo. El último de los valores que se listan al pie del gráfico, en la línea amarilla, corresponde a un valor directo del ancho en píxeles a mitad de altura del objeto analizado (FWHM) (Fig. A.2). Para obtener este valor (que adoptaremos como una estimación del *seeing* en la imagen) en arcsec, tenga en cuenta la escala en segundos de arco por pixel obtenida en el punto anterior. Se adoptará como valor indicativo, un promedio del resultado para varias estrellas.

3. Utilice las siguientes expresiones para obtener los puntos de cero (Z_x) requeridos para transformar al sistema estándar los valores fotométricos determinados por SExtractor:

$$Z_{g'} = 28.239 + 2.5 \log t - 0.18 (X - 1.0) \quad (\text{A.1})$$

$$Z_{r'} = 28.128 + 2.5 \log t - 0.10 (X - 1.0) \quad (\text{A.2})$$

donde t es el tiempo de exposición de la imagen en cuestión, X es la masa de aire efectiva de la observación, y se han considerado los valores medios de extinción atmosférica en Cerro Pachón.

NOTA: t aparece de manera explícita en estas expresiones debido a que SExtractor obtiene valores de las magnitudes integradas sin considerar ninguna normalización por el tiempo de exposición.

4. De la página web de la cátedra², descargue en el mismo directorio donde se encuentran las imágenes de trabajo, el paquete SExtractor.tar, y descomprímalo. A continuación:

- a) Edite el archivo *default.sex*. En la sección *Photometry* cambie los valores de los parámetros SATUR_LEVEL, GAIN, PIXEL_SCALE y MAG_ZEROPOINT, por los encontrados para el nivel de saturación de la imagen, la ganancia, la escala de la imagen y punto de cero para la fotometría, respectivamente.
- b) En la sección *Catalog*, cambie el valor del parámetro CATALOG_NAME por *imagen_g.cat*.
- c) En la sección *Star/Galaxy Separation*, cambie el valor del parámetro SEEING_FWHM por el encontrado para el *seeing* de la imagen g' .
- d) En la sección *Background*, cambie el parámetro BACKPHOTO_TYPE a *LOCAL*.
- e) En la sección *Check Image* cambie el parámetro CHECKIMAGE_TYPE por *APERTURES*, *BACKGROUND* y el parámetro CHECKIMAGE_NAME por *check_g.fits,check_gb.fits*.
- f) Salga del editor grabando, y realice una primera corrida del programa tipeando por línea de comandos la siguiente instrucción:
sextractor smrgS20030301S0149_add.fits -c default.sex

NOTA: en el Aula Informatizada se ha cambiado el nombre del binario *sex*, a *sextractor*.

g) Realice diferentes corridas del software modificando los siguientes parámetros en el archivo *default.sex*, de a uno por vez.

Parámetro	valor
DETECT_MINAREA	7
FILTER	Y
FILTER_NAME	<i>gauss_15_17x17.conv</i>
FILTER_NAME	<i>gauss_5.0_9x9.conv</i>
DEBLEND_NTHRESH	32
DEBLEND_MINCONT	0.0001
BACK_SIZE	64
BACK_SIZE	32

NOTA: recuerde cambiar los nombres de los archivos de salida antes de cada corrida, para evitar que SExtractor reescriba los distintos resultados.

En todos los casos, despliegue las imágenes generadas por el programa y comente los resultados. Para ello, intente comparar los diversos aspectos que se mencionan a continuación (varios de los cuales pueden consultarse en el manual facilitado por la cátedra):

²<http://carina.fcaglp.unlp.edu.ar/extragalactica/>

- Número de objetos detectados en cada uno de los nueve casos.
 - Apariencia de las aberturas en las imágenes de salida.
 - Detección en las zonas más complejas del campo (región central del cúmulo).
 - Detección de objetos débiles o difusos.
 - Separación de objetos superpuestos.
 - Detección espuria de picos de ruido en la imagen.
 - Efecto del modelado del cielo.
- h) SExtractor distingue objetos extendidos de aquellos no resueltos mediante el parámetro de salida CLASS_STAR. Este parámetro toma valores entre 0 y 1, donde 0 corresponde a objetos resueltos y 1 a objetos puntuales. En base a la última corrida realizada, construya el gráfico CLASS_STAR contra MAG_AUTO. ¿Qué puede comentar acerca de la confiabilidad de la separación efectuada por SExtractor, a partir de este gráfico?

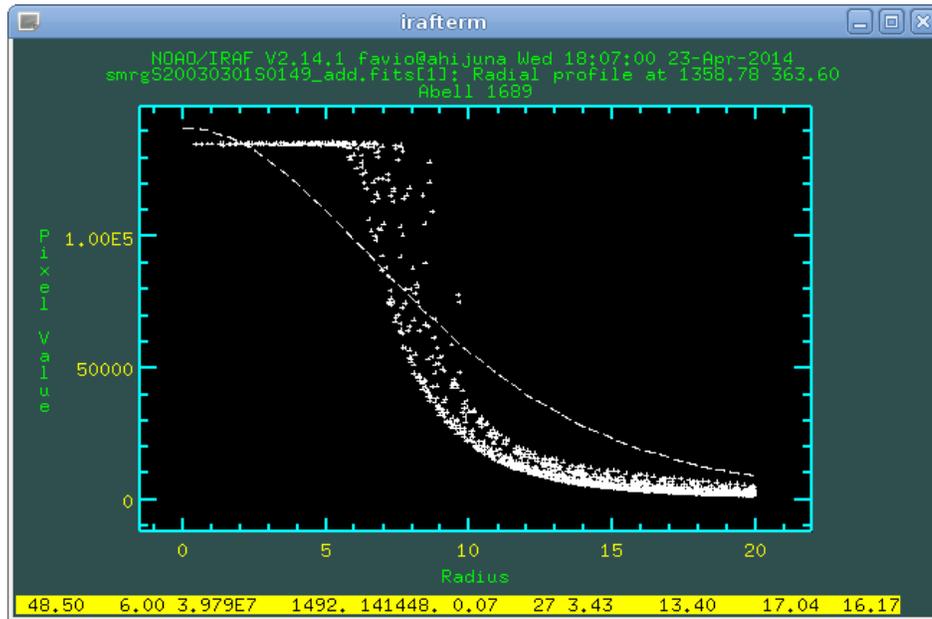


Figura A.1: Perfil radial de una estrella saturada obtenido mediante la opción `r` de la tarea `imexa` de IRAF. La meseta superior se corresponde con el nivel de saturación para el objeto examinado.

5. Se han registrado las imágenes g' y r' , habiéndose llevado esta última al mismo sistema de coordenadas de la primera: `smrgS20030301S0141_add_trn.fits`. Ejecute una vez más el software, mediante la siguiente línea de comandos, la cual hace uso del denominado *dual-image mode* de SExtractor:

```
sextractor smrgS20030301S0149_add.fits,smrgS20030301S0141_add_trn.fits -c
default.sex
```

Luego, junte el catálogo de salida resultante de esta corrida, con el resultante de la última corrida sobre la imagen g' . Para ello, puede utilizar la siguiente instrucción:

```
paste ultimo_g.cat ultimo_r.cat > catalogo_g_r.cat
```

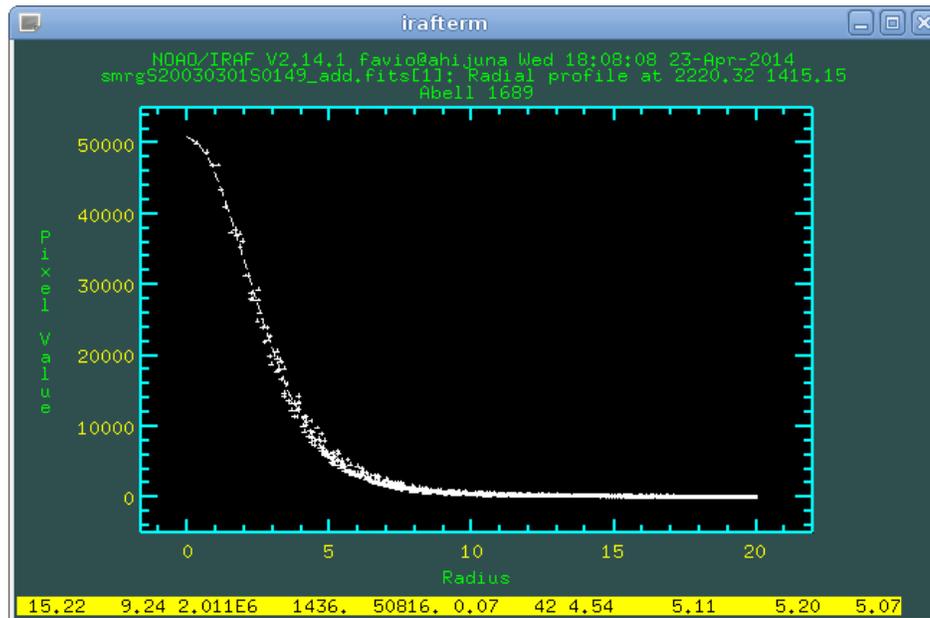


Figura A.2: Perfil radial de una estrella no saturada obtenido mediante la opción `r` de la tarea `imexa` de IRAF. El último valor listado al pie del gráfico corresponde al FWHM del objeto en píxeles, el cual puede ser considerado como una estimación del *seeing* en la imagen.

NOTA: El archivo `default.sex` debe ser modificado de acuerdo a los parámetros de ganancia y punto de cero de la imagen sobre la cual se quiere realizar la fotometría, no la detección.

6. Realice un diagrama color-magnitud utilizando las magnitudes g' y r' determinadas por SEXTRACTOR. Comente los resultados.
7. Realice un nuevo diagrama color-magnitud seleccionando únicamente los objetos que cumplen con las condiciones:
 - MAG_AUTO < 90
 - A_IMAGE > 4
 - FLAGS < 4
 - CLASS_STAR < 0.3

Compare y comente los gráficos obtenidos en los puntos 6 y 7. Estime un número aproximado de galaxias resueltas presentes en el campo.

NOTA: Si lo desea, puede comparar con algunos resultados del trabajo de [Houghton et-al. \(2012\)](#), basado en imágenes similares obtenidas con GMOS-N.

Bibliografía

Bertin, E. & Arnouts, S. 1996, A&AS, 117, 393

Houghton, R. C. W., Davies, R. L., Dalla Bontà, E., & Masters, R. 2012, MNRAS, 423, 256

Astronomía Extragaláctica – Laboratorio B

Rotación de galaxias

Archivos auxiliares:

- N42.tar:
 - N42_ap1.fts
 - N42_ap2.fts
 - N42_ap3.fts
 - N42_ap7.fts
 - N42_ap8.fts
 - N42radii.dat
 - HD103295.ms.fts

1. Con los espectros tipo “ranura larga” provistos para la galaxia N42 y la estrella estándar de velocidad radial HD 103295, mida la velocidad radial heliocéntrica de la galaxia en función del semieje mayor a , y construya su curva de rotación.

Para ello utilice la tarea `fxcor` de `IRAF`, teniendo en cuenta las recomendaciones de Tonry & Davis (1979, AJ, 84, 1511) para el filtrado previo de los espectros.

En este caso, la resolución se puede considerar $\Delta\lambda = 1.7 \text{ \AA}$, y los límites en λ son 4161.3 \AA y 5631.0 \AA (ver el header de `HD103295.ms`).

El espectro en coordenadas logarítmicas en λ es:

$$n = A \ln(\lambda) + B$$

y son 2048 pixeles, de donde se obtiene A y la resolución en pixeles logarítmicos con:

$$\Delta n = A \ln\left(\frac{\lambda_{\text{cent}} + \Delta\lambda}{\lambda_{\text{cent}}}\right)$$

lo que corresponde a un número de onda en el espacio Fourier:

$$N_1 = \frac{2048}{2\pi \Delta n}$$

\therefore prácticamente todo por encima de número de onda $2N_1$ es ruido, y lo que está por debajo de $N = 10$ es residuo de resta de continuo. Por lo tanto, el filtro de rampa debería tener estos parámetros:

```
filtpars.f_type = "ramp"  
filtpars.cuton = 10  
filtpars.cutoff = (N1)  
filtpars.fullon = 20  
filtpars.fulloff = (2 N1)
```

Inserte o actualice el valor de VHELIO en el encabezamiento de la imagen de la estrella estándar con el valor de velocidad radial publicado (ver [Simbad](#)).

Datos: El fxcor requiere AR en horas .
--

Astronomía Extragaláctica – Laboratorio C

Fotometría diferencial de AGN

1. Estudie el comportamiento del blazar PKS 0537–441 en el filtro *R* utilizando su curva de luz diferencial. Para ello, siga los pasos que se indican a continuación:

- a) Descargue de la página de la cátedra el archivo “0537.tar.gz”. Este archivo contiene 33 imágenes del blazar PKS 0537–441 tomadas con el telescopio de 2,15 m Jorge Sahade del CASLEO durante la noche del 16 al 17 de diciembre de 1998. Se usó una cámara CCD con un chip Tektronix 1024×1024 + Reductor Focal. La escala final de las imágenes es de $0.8125 \text{ arcsec px}^{-1}$. Estas imágenes ya están corregidas y recortadas.
- b) Busque el objeto en la base de datos de objetos extragalácticos de la NASA, NED¹. En esta base de datos se pueden conocer valores básicos del objeto, lista de publicaciones, etc. Busque allí el valor del corrimiento al rojo y baje una imagen visual del campo centrado en el objeto con tamaño adecuado para poder comparar con las imágenes tomadas en CASLEO. Esto es, un campo de $\sim 10 \text{ arcmin} \times 10 \text{ arcmin}$. Note que NED presentará una lista de objetos, el correcto es el primero de esa lista (mire las características que dan en la lista) y eligiendo esa opción, le brindará toda la información requerida.
- c) Para construir la curva de luz diferencial, usaremos tareas de IRAF. En particular, usaremos la tarea `phot`, que está dentro del paquete `digiphot.apphot`. Esta tarea nos permitirá calcular las magnitudes instrumentales tanto del objeto como de las estrellas de campo que se usen para la fotometría diferencial.
NOTA: para saber la ubicación de cualquier tarea del IRAF, se puede llamar al manual de la tarea con `>help "nombredelatarea"` y en el encabezado de la salida figurará la lista de paquetes que hay que cargar.
- d) Editamos la tarea con `>eparam phot` o, simplemente, `>epar phot`. Lo que aparece en la pantalla es algo como lo que se muestra a continuación.

```
image = ""           The input image(s)
skyfile = ""        The input sky file(s)
(coords = "")       The input coordinate files(s) (default:
                    image.coo.?)
(output = "default") The output photometry file(s) (default:
                    image.mag.?)
(plotfile = "")     The output plots metacode file
(datapars = "")     Data dependent parameters
```

¹<http://ned.ipac.caltech.edu/forms/nearname.html>

```

(centerpars = "")      Centering parameters
(fitskypars = "")     Sky fitting parameters
  (photpars = "")     Photometry parameters
(interactive = no)    Interactive mode ?
  (radplots = no)     Plot the radial profiles in ...
(icommands = "")     Image cursor: [x y wcs] key [cmd]
(gcommands = "")     Graphics cursor: [x y wcs] key [cmd]
  (wcsin = )_.wcsin)  The input coordinate system ...
  (wcsout = )_.wcsout) The output coordinate system ...
  (cache = )_.cache)  Cache the input image pixels ...
  (verify = )_.verify) Verify critical parameters in ...
  (update = )_.update) Update critical parameters in ...
  (verbose = )_.verbose) Print messages in non-interactive mode?
(graphics = )_.graphics) Graphics device
(display = )_.display) Display device
  (mode = "ql")

```

En la variable `image` va el nombre de la imagen a la que se le quiere hacer la fotometría. Dentro de esta tarea, hay que fijar varios parámetros de acuerdo a los criterios que se deseen adoptar para reducir las observaciones. Estos parámetros están dentro de la lista de comandos `datapars`, `centerpars`, `fitskypars` y `photpars`. Para poder verlos y/o editarlos, nos ubicamos en la línea y con “:e” se editan los parámetros.

Detalle de cada lista de parámetros:

1) `datapars`:

```

  (scale = 1.)        Image scale in units per pixel
  (fwhmpsf = 2.5)     FWHM of the PSF in scale units
  (emission = yes)    Features are positive ?
  (sigma = INDEF)     Standard deviation of background ...
  (datamin = INDEF)   Minimum good data value
  (datamax = INDEF)   Maximum good data value
  (noise = "poisson") Noise model
  (ccdread = "rdnoise") CCD readout noise image header ...
  (gain = "gain")     CCD gain image header keyword
  (readnoise = 4.4)   CCD readout noise in electrons
  (epadu = 1.83)     Gain in electrons per count
  (exposure = "exptime") Exposure time image header keyword
  (airmass = "airmass") Airmass image header keyword
  (filter = "filters") Filter image header keyword
  (obstime = "hjd")   Time of observation image header ...
  (itime = 1.)        Exposure time
  (xairmass = INDEF)  Airmass
  (ifilter = "INDEF") Filter
  (otime = "INDEF")  Time of observation
  (mode = "ql")

```

Los parámetros que debemos tener en cuenta para modificar son: `scale`: es la escala con la que se trabajará (si es 1 se trabaja en pixels); `noise`, `ccdread`, `gain`,

exposure, airmass, filter, obstime: son los nombres de estas variables en el encabezamiento de la imagen y deben corresponder con los mismos.

NOTA: para ver el encabezamiento de la imagen: >imheader "nombredelaimagen"

- 2) centerpars: se dan los parámetros para el algoritmo de centrado.
- ```
(calgorithm = "centroid") Centering algorithm
 (cbox = 5.) Centering box width in scale units
(cthreshold = 0.) Centering threshold in sigma ...
(minsnratio = 1.) Minimum signal-to-noise ratio ...
 (cmaxiter = 10) Maximum number of iterations ...
 (maxshift = 1.) Maximum center shift in scale units
 (clean = no) Symmetry clean before centering?
 (rclean = 1.) Cleaning radius in scale units
 (rclip = 2.) Clipping radius in scale units
 (kclean = 3.) Rejection limit in sigma
 (mkcenter = no) Mark the computed center on display?
 (mode = "ql")
```

Son importantes aquí, el calgori, tipo de algoritmo; cbox, tamaño de la caja donde busca el centro aplicando el algoritmo elegido en unidades de la escala.

- 3) fitskypars: parámetros para calcular los valores de cielo.
- ```
(salgorithm = "mean")    Sky fitting algorithm
      (annulus = 18.)    Inner radius of sky annulus ...
      (dannulus = 24.)  Width of sky annulus in ...
      (skyvalue = 0.)   User sky value
      (smaxiter = 10)   Maximum number of sky fitting ...
      (sloclip = 0.)   Lower clipping factor in percent
      (shiclip = 0.)   Upper clipping factor in percent
      (snreject = 50)   Maximum number of sky fitting ...
      (sloreject = 3.)  Lower K-sigma rejection limit ...
      (shireject = 3.)  Upper K-sigma rejection limit ,,
      (khist = 3.)     Half width of histogram ...
      (binsize = 0.10) Binsize of histogram in sky sigma
      (smooth = no)    Boxcar smooth the histogram
      (rgrow = 0.)     Region growing radius ...
      (mksky = no)     Mark sky annuli on the display
      (mode = "ql")
```

Los parámetros importantes aquí son salgori, tipo de algoritmo que se aplica para el cálculo del valor de cielo; annulus, es el valor del radio interior del anillo que se toma para calcular el cielo alrededor del objeto; dannulus, el valor del radio de ese anillo.

NOTA: para fijar los valores de annulus y dannulus, se puede desplegar una imagen y utilizando la tarea imexamine, trazar un perfil del objeto (ubicamos el cursor sobre el objeto en el imagen y pulsamos la tecla "r") y usar ese gráfico para elegir el valor de annulus (debería ser un poco más grande que el valor de radio donde termina el objeto). Para dannulus, lo más conveniente es elegirlo tal que el área del anillo de cielo sea lo más similar posible al área del círculo donde se integra el flujo del objeto.

- 4) photpars:

```
(weighting = "constant")    Photometric weighting scheme ...
(apertures = "2,4,6,8,10,12") List of aperture radii ...
  (zmag = 22.5)              Zero point of magnitude scale
  (mkapert = no)            Draw apertures on the display
  (mode = "q1")
```

Aquí son importantes los valores que elijamos de `apertures`, que están dados en unidades de la escala elegida y no son otra cosa que los radios de las aberturas donde se realizará la fotometría. Se suele definir más de un valor, para luego elegir la más adecuada. La elección de las aberturas se puede realizar usando el `imexamine` de la misma manera descrita en el punto anterior.

- e) Se fijan los parámetros y se corre la tarea `phot`. Lo que se busca es tener los archivos `ascii` que genera esta tarea (los `nombredelaimagen.mag.1` donde está guardada la información de la fotometría dentro de cada radio de abertura elegido y no sólo para el objeto de estudio, si no también para la mayor cantidad de estrellas del campo posible.

Para correr la tarea `phot`, desplegar la imagen sobre la que se quiere realizar la fotometría, y luego correr la tarea. El cursor irá a la imagen, lo ubicamos sobre el objeto, y con la barra espaciadora nos da los valores; luego ubicamos el cursor sobre la primera estrella y nuevamente con la barra espaciadora tendremos los valores; nos movemos hacia la siguiente estrella y repetimos esta acción hasta la última estrella seleccionada. Luego, con “q” y otra vez “q” salimos de la tarea y grabamos los valores en un archivo `ascii`.

NOTA: *Es importante que las estrellas en todas las imágenes sean las mismas y guarden la misma numeración.* Para poder lograr esto, conviene correr la tarea `phot` en forma interactiva con una imagen solamente. Una vez que tenemos el archivo `ascii .mag.1` de esa imagen, con la tarea `txdump` seleccionamos de este archivo los valores de “XCENTER” e “YCENTER”. Haciendo “>txdump xcen,ycen yes > coord.txt” genera un archivo con solo las coordenadas de los objetos (el objeto de ciencia conviene que sea el primero en ser elegido). Este archivo se utiliza luego dentro del `phot` en la línea `coords`. Entonces, al correr el `phot` luego de teclear barra espaciadora sobre el primer objeto de la lista, se tecléa “I” y de esta manera se hace la fotometría del resto de las estrellas de campo elegidas. De esta manera, en todos los frames se podrán elegir las mismas estrellas y en la misma secuencia. También se puede correr el `phot` en modo no interactivo.

- f) Una vez que se tienen todos los archivos `ascii` con los valores de la fotometría sobre el objeto y la lista de estrellas para cada una de las imágenes, procedemos con la fotometría diferencial. Esto es, vamos a buscar la magnitud del objeto relativa a una estrella del campo. Para ello debemos elegir dos estrellas, una llamada de comparación y otra de control. Estas estrellas no pueden ser estrellas variables y además deben cumplir lo mejor posible con el siguiente criterio: **la estrella de comparación debería ser un poco más brillante que el objeto y la de control con magnitud lo más similar posible a la del objeto.**

Nuevamente, para elegir estas estrellas podemos utilizar la tarea `txdump` ahora pidiéndole que nos liste, por ejemplo, “ID”, “mag[3]” de alguno de los archivos `.mag.1` (el número dentro de los corchetes luego de `mag` es para elegir la abertura donde queremos el valor de `mag`; recordemos que elegimos en más de una abertura; este número es la posición en la lista, no el valor de la abertura). Esto nos dará una lista por pantalla de las magnitudes instrumentales para un dado momento ya que elegimos un archivo en particular. Es conveniente hacer este procedimiento en distintos instantes para poder elegir mejor.

- g) Una vez elegidas ambas estrellas, se pueden construir las curvas. Entonces, si T indica el

objeto y S_1 es la estrella de comparación, tendremos que:

$$m_T = Z_0 - 2.5 \log F_T \quad (C.1)$$

$$m_1 = Z_0 - 2.5 \log F_1 \quad (C.2)$$

donde Z_0 es el punto de cero de las magnitudes.
Luego,

$$\Delta m_T = (m_T - m_1) = -2.5 \log \left(\frac{F_T}{F_1} \right) \quad (C.3)$$

Con esto, buscamos construir una curva dependiente del tiempo que, para cada punto t_i le corresponda un valor de $(m_T - m_1)_i$. Luego, tendremos la variación temporal de la fotometría diferencial, esto es, la curva de luz diferencial del objeto.

- h) De igual manera se procede con la segunda estrella, la de control (que llamaremos estrella S_2), restada con la misma estrella de comparación usada para el objeto. Se obtiene la curva de t_i vs. $\Delta m_2 = (m_2 - m_1)_i$. Toda variación en esta curva será debida a los errores fotométricos, mientras que los efectos atmosféricos (por ejemplo, cambios en el seeing) o problemas instrumentales deberían eliminarse con la fotometría diferencial.
- i) Cálculo de la variabilidad: Para poder saber si la fuente resultó variable, debemos calcular las dispersiones de cada una de estas curvas que hemos construido. O sea,

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta m_i - \langle \Delta m \rangle)^2}{n - 1}}. \quad (C.4)$$

Esta dispersión se calcula para ambas curvas. Luego, tendremos σ_T para la dispersión de la curva de luz diferencial del objeto y σ_2 para la dispersión de la curva de luz diferencial de la estrella de control. Con estos valores, podemos calcular el parámetro C , definido como:

$$C = \frac{\sigma_T}{\sigma_2}. \quad (C.5)$$

Luego, si $C \geq 2.576 \mapsto$ el objeto en cuestión resulta ser variable con un 99 % de nivel de confiabilidad.

2. Con lo explicado en el inciso anterior, construya ambas curvas de luz diferenciales (el tiempo de observación puede ser extraído de los encabezamientos de las imágenes), calcule el parámetro C y responda sobre el estado de variabilidad del blazar.

NOTA 1: los valores necesarios para poder realizar todo esto están en los archivos .mag.1 y pueden ser extraídos de allí.

NOTA 2: Utilice el programa o la metodología que le resulte más común para realizar los gráficos y los cálculos (graficadores, planillas de cálculo, etc.). Solo explique lo realizado.

COMENTARIO IMPORTANTE: (fuera de la práctica)

El parámetro C aquí definido es un estimador. En la realidad, lo más adecuado es aplicar el mismo parámetro pero pesando la estadística con un factor llamado Γ , que fue introducido por Howell et al. (1988, AJ, 95, 247) y tiene en cuenta las diferencias de magnitudes entre el objeto, la estrella de comparación y la de control. Tengamos en cuenta que no siempre es posible encontrar estrellas en el campo de la imagen que cumplan exactamente con los requisitos planteados más arriba. Y las diferencias entre las magnitudes instrumentales introducen error en las curvas, lo que lleva a que las dispersiones no sean, en todos los casos, las correctas, derivando en un parámetro C que puede ser erróneo (debido a los errores fotométricos la dispersión de la curva de luz del objeto más débil será mayor).

Usando el factor Γ , el parámetro C queda definido como:

$$C_{\Gamma} = \frac{\sigma_{\Gamma}}{\Gamma\sigma_2}. \quad (\text{C.6})$$

El factor Γ se construye de la siguiente manera:

$$\Gamma^2 = \frac{N_2^2}{N_T} \left[\frac{N_1^2(N_T + P) + N_T^2(N_1 + P)}{N_2^2(N_T + P) + N_T^2(N_2 + P)} \right] \quad (\text{C.7})$$

donde: N_x es el número de fotones detectados para el objeto x , $P = n_p(N_s + N_r^2)$, N_s número de fotones correspondientes al anillo del cielo, N_r el ruido de lectura, n_p número de pixeles dentro de la abertura elegida para la fotometría.

Si bien este método se aplica en la presente práctica al caso de un blazar, el mismo puede utilizarse para estimar la variabilidad de cualquier fuente astronómica.