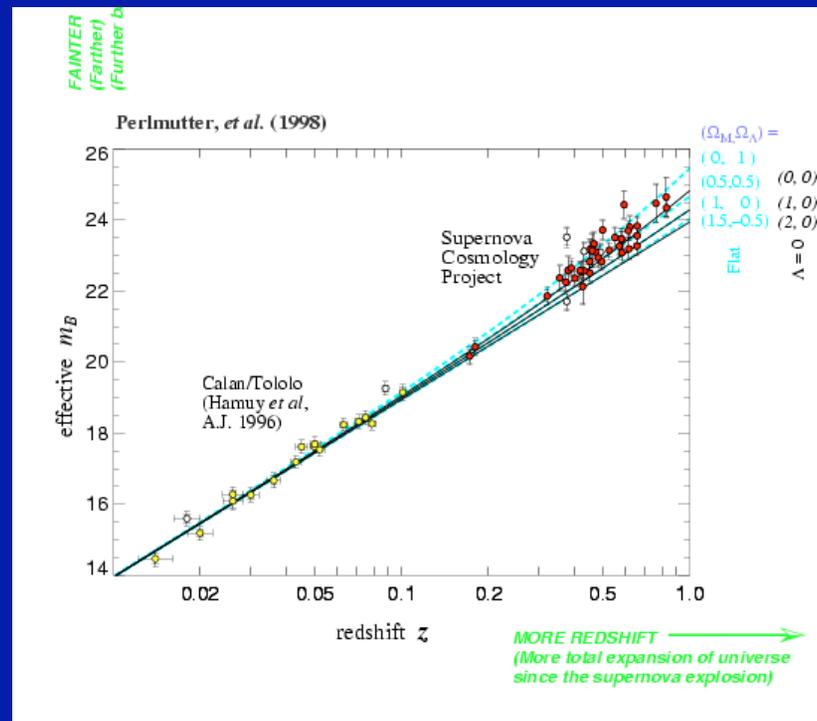


Aplicaciones Evolución de Galaxias

- Evolución pasiva en cúmulos de galaxias y q_0
- Razón Masa-Luminosidad Fotométrica
- Número de estrellas en distintas fases de evolución.
- Pérdida de masa de estrellas.

Evolución Pasiva en Cúmulos.

Un método tradicional para medir q_0 es usar la galaxia elíptica más brillante del cúmulo, como patrón de distancia, y buscar desviaciones en el diagrama de Hubble.



Recordemos que la distancia luminosa, se puede escribir en términos de q_0 , H_0 y z como,

$$d_L = \sqrt{\frac{L}{4\pi f}}$$

$$d_L = \frac{c}{H_0 q_0^2} \left[q_0 z - (1 - q_0)(\sqrt{1 + 2q_0 z} - 1) \right]$$

Si expandimos en serie de Taylor alrededor de $z = 0$

$$d_L = \frac{cz}{H_0} \left[1 + \frac{1}{2}(1 - q_0)z + \dots \right]$$

Ahora derivemos la relación redshift-magnitud (diagrama de Hubble)

$$\begin{aligned} m - M &= 5 \log(d_L / 10 \text{ pc}) \\ &= 5 \log \left[\frac{cz}{H_0} \right] + 5 \log \left[1 + \frac{1}{2}(1 - q_0)z + \dots \right] \end{aligned}$$

**Expandiendo el último término alrededor de $z=0$, y
manteniendo los términos de primer orden,**

$$m_{bol} = M_{bol} + 5 \log\left(\frac{cz}{H_0}\right) + 1.086(1 - q_0)z$$

**Para z altos la relación entre magnitud aparente y $\log(z)$
no es lineal, muestra una curvatura que depende de q_0 :
Para z altos las galaxias se verán más débiles por una
cantidad pequeña,**

$$\Delta m = 1.086(1 - q_0)z$$

Veamos que hace la evolución pasiva en el diagrama de Hubble para galaxias elípticas. De la ecuación que describe la evolución luminosa de la población estelar,

Recordemos 
$$L_t = L_d \{1 + G(t)\} = \frac{M_0 \phi_1 l_1}{\alpha - x} \{1 + G(t)\} \left(\frac{t}{\tau_1} \right)^{\frac{\alpha - x}{1 - \alpha}}$$

$$\ln(L_t) = \ln\left(\frac{M_0 \phi_1 l_1}{\alpha - x}\right) + \ln[1 + G(t)] - \frac{\alpha - x}{1 - \alpha} \ln \tau_1 + \frac{\alpha - x}{1 - \alpha} \ln t$$

tal que,

$$\begin{aligned} \frac{d \ln(L_t)}{d \ln t} &= \frac{\alpha - x}{1 - \alpha} + \frac{d}{dt} \{ \ln[1 + G(t)] \} \frac{dt}{d \ln t} \\ &= \frac{\alpha - x}{1 - \alpha} + \frac{t}{1 + G(t)} \frac{dG}{dt} \end{aligned}$$

Recordemos que

$$G(t) = \frac{L_g}{L_d} = \frac{(\alpha - x)l_g\tau_g}{(\alpha - 1)l_1\tau_1} \left(\frac{t}{\tau_1} \right)^{1/\alpha-1}$$

Derivando $G(t)$ y después de un poco de álgebra,

$$E = \frac{d \ln L}{d \ln t} = \frac{1}{\alpha - 1} \left\{ x - \alpha + \frac{G}{G + 1} \right\}$$

Con Salpeter, $\alpha = 3.5$, y $G = 6 \Rightarrow E = -0.5$

Consideremos una galaxias a redshift z . Para un universo Einstein de Sitter, el “look back time” es,

Look back time

$$\Delta t = \frac{2}{3} \frac{1}{H_0} \left\{ - (1+z)^{-3/2} \right\}$$
$$\approx \frac{2}{3} \frac{1}{H_0} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{3}{2} (1+z)_{z=0}^{-5/2} z + \dots \right) \right\} \approx \frac{z}{H_0}$$

La evolución en luminosidad es por lo tanto,

$$\ln L_z - \ln L_0 = E \left\{ \ln \left(t_0 - \frac{z}{H_0} \right) - \ln t_0 \right\}$$

Convirtiendo esto a magnitudes,, y expandiendo en series de Taylor alrededor de $z=0$,

$$\Delta m = -2.5 \log e \cdot E \ln \left\{ 1 - \frac{z}{H_0 t_0} \right\} \approx 1.086 E \left\{ \frac{1}{1 - (z/H_0 t_0)} \cdot \frac{1}{H_0 t_0} \right\}_{z=0} \cdot z$$
$$\approx 1.086 E \left(\frac{z}{H_0 t_0} \right) \approx 1.086 E z$$

Esto nos dice que para z mayores las galaxias se verán mas brillantes de lo que predice la ley de Hubble. Mas aun, si hacemos la equivalencia,

$$\Delta m = 1.086(1 - q_0)z = 1.086Ez \Rightarrow q_0 = 1 - E \approx 1.5$$

En otras palabras, si se quiere usar galaxias elípticas como patrones de distancia, hay que corregir por evolución pasiva de sus estrellas. Esta corrección puede ser grande

$$\Delta m = q_0(\text{observado}) - q_0(\text{real}) = 1.5$$

Razón masa-luminosidad fotométrica

Primero calculamos la luminosidad total de estrellas en la SP de una población estelar y luego la masa total.

Luminosidad

$$L_d = \frac{M_0 \phi_1 l_1}{\alpha - x} \left\{ \left(\frac{m_{tn}}{m_1} \right)^{\alpha - x} - \left(\frac{m_L}{m_1} \right)^{\alpha - x} \right\}$$

$\alpha - x > 0 \Rightarrow$ último término es despreciable \Rightarrow estrellas de baja masa no contribuyen mucho a la **luminosidad.**

Masa

$$\begin{aligned} M_0 &= M_0 \int_{m_L}^{m_U} m \phi(m / m_1) d\left(\frac{m}{m_1}\right) \\ &= M_0 \int_{m_L}^{m_U} m \phi_1(m / m_1)^{-x} d\left(\frac{m}{m_1}\right) \\ &= \frac{M_0 \phi_1}{1-x} \left\{ \left(\frac{m_U}{m_1}\right)^{1-x} - \left(\frac{m_L}{m_1}\right)^{1-x} \right\} \end{aligned}$$

Donde m_U es la masa mayor considerada (entre 60 y 100 masas solares). Si $x > 1 \Rightarrow 1-x < 0$, la masa total está dominada por el último término, lo que significa que la mayor parte de la **masa total** de la población está en estrellas de baja masa.

Conclusión:

Estrellas de baja masa contribuyen muy poco a la luminosidad pero mucho a la masa.

Número de estrellas en distintas fases de evolución.

Nos interesa calcular el número de estrellas que pasan por alguna fase de evolución (post SP), en un tiempo dado. Este número se controla por la tasa a la cual las estrellas dejan la SP. (Todas las otras tasas son mucho más rápidas.)

Como vimos anteriormente, la tasa de estrellas dejando la SP es,

$$N_{in} = M_0 \phi \left(\frac{m_{in}}{m_1} \right) \frac{dm_{in}}{dt} = M_0 \phi_1 \left(\frac{m_{in}}{m_1} \right)^{-(1+x)} \frac{d(m_{in}/m_1)}{dt}$$

Tambien sabemos que $\frac{m_{in}}{m_1} = \left(\frac{t}{\tau_1} \right)^{1/1-\alpha}$

derivando $\Rightarrow \frac{d(m_{in}/m_1)}{dt} = \frac{1}{\tau_1(1-\alpha)} \left(\frac{t}{\tau_1} \right)^{\alpha/1-\alpha}$

$$\Rightarrow N_{in} = \frac{M_0 \phi_1}{\tau_1(1-\alpha)} \left(\frac{t}{\tau_1} \right)^{\frac{\alpha-x-1}{1-\alpha}}$$

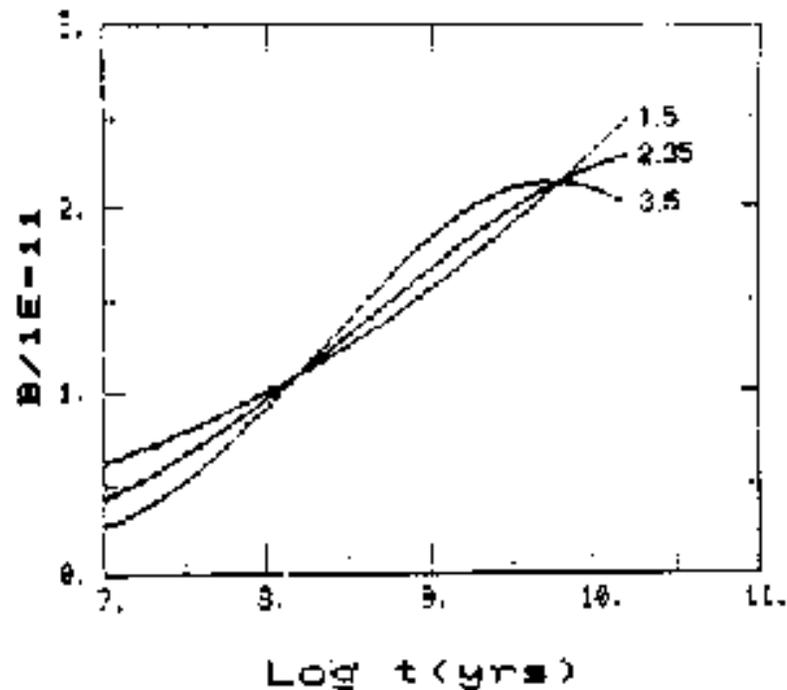
El número de estrellas dejando la SP en una galaxia es proporcional al número de estrellas en la galaxia. La mejor forma de eliminar esta dependencia es normalizar respecto al tamaño de la galaxia. Como la masa es incierta, usamos la luminosidad total para definir el flujo estelar específico, b .

$$b = \frac{N_{tn}}{L_t} = \frac{\alpha - x}{l_1 \tau_1 (\alpha - 1) (1 + G(t))} \left(\frac{t}{\tau_1} \right)^{1/\alpha - 1}$$

- Notar que $(1/\alpha - 1) < 1$; b no depende mucho del tiempo
- Notar que b tampoco depende mucho de x

Ejemplo: Para una población vieja $b \approx 2 \times 10^{11}$ estrellas $yr^{-1} L_{sol}^{-1}$

Con esto podemos predecir el número de estrellas de cualquier población post SP. E.g. Nebulosas Planetarias viven cerca de $\tau \approx 25000$ años. Si la luminosidad de la galaxia es $L \approx 10^{11} L_{sol}$ entonces $N(\text{PN}) \approx b \cdot L \cdot \tau = 50000$.



The plot above shows how a population's stellar evolutionary flux (stars evolving through a particular phase of evolution per unit time per unit bolometric luminosity of the population) changes with the system's age and IMF. Note that the x-axis (population age) is a log quantity, while the y-axis is linear. An old ($\gtrsim 3$ Gyr) stellar population with an absolute (bolometric) luminosity of $10^{11} L_{\odot}$ has about 2 stars per year turning off the main sequence, independent of the system's age or initial mass function.

Perdida de masa de estrellas

Calculemos la pérdida de masa de estrellas en función del tiempo.

- Casi toda la masa perdida de estrellas ocurre durante las fases post SP.
- Por lo tanto, la tasa de masa perdida es proporcional al número de estrellas que dejan la SP y la cantidad de masa cada estrella pierde.

Si m es la masa inicial, y w es la masa del remanente, la tasa de eyección de masa es,

$$E(t) = N_{tn} (m_{tn} - w) = M_0 \phi(m_{tn}) \frac{dm_{tn}}{dt} (m_{tn} - w)$$

Sustituyendo la derivada y normalizando por luminosidad total encontramos la pérdida de masa específica.

$$\frac{E(t)}{L_t} = \frac{\alpha - x}{1 + G(t)} \frac{(m_{tn} - w)}{\alpha - 1} \frac{1}{l_{tn} t}$$

Numéricamente

- La tasa de pérdida de masa resulta $\sim 0.02M_{\text{sol}}$ por Gyr por unidad de luminosidad solar para una población estelar vieja de 10^{10} años.
- Integrada sobre la vida de una galaxia, resulta que el 15% de la masa original de las estrellas se pierde en un tiempo de Hubble.