

Història de la formació estel·lar d'una galàxia a partir de cúmuls de massa màxima

Estudiant: Sergi Blanco Cuaresma

31 de gener de 2011

Resum

Síntesis dels articles “*A new method to derive star formation histories of galaxies from their star cluster distributions*” (Maschberger & Kroupa 2007) i “*The star formation history of the Large Magellanic Cloud as seen by star clusters and stars*” (Maschberger & Kroupa 2010), a on es presenta un mètode per obtenir l'història de la formació estel·lar d'una galàxia a partir del cúmuls de massa màxima de cada època de formació.

Índex

1	Introducció	2
2	Descripció del mètode	2
2.1	Relació massa màxima i rati de formació estel·lar (SFR)	2
2.2	Finestra temporal	4
2.2.1	Correcció per l'evolució dels cúmuls	4
2.2.2	Èpoques sense cúmuls observables	5
2.3	Proves amb poblacions de cúmuls estel·lars sintètics	5
2.3.1	SFR constant i sense incertesa a les edats	5
2.3.2	SFR constant amb evolució de cúmuls i limit observacional	5
2.3.3	SFR variable	6
2.3.4	SFR variable amb ràfegues	7
2.4	Criteri de detecció de variacions	8
3	Història de la formació estel·lar del gran núvol de Magallanes	9
3.1	Dades	9
3.2	Cúmuls més massius	11
3.3	Població total de cúmuls	11
3.4	Comparació amb la SFH obtinguda a partir de diagrames color-magnitud	12
4	Conclusions	13

1 Introducció

La formació d'estrelles es produeix de forma agrupada a partir de núvols moleculars que posteriorment formen cúmuls. A partir de l'anàlisi d'aquest cúmuls és possible entendre la història de la formació estel·lar d'una galàxia.

- Els cúmuls d'estrelles tenen una vida molt llarga.
 - Esdeveniments com la interacció entre galàxies comporten un augment en la formació estel·lar
- L'estudi dels cúmuls representen les empremtes que ens permeten deduir la història de la formació estel·lar d'una galàxia (d'ara en endavant també SFH per les sigles en angles “*Star Formation History*”), que no és més que la progressió del rati de formació estel·lar (d'ara en endavant també SFR per les sigles en angles “*Star Formation Rate*”) durant el temps.

Per extreure els detalls de l'història de la formació estel·lar d'una galàxia es possible utilitzar el mètode dels diagrames color-magnitud, pel qual es requereix resoldre les estrelles individuals dels cúmuls. Llavors, a partir de les isòcronas teòriques, es possible reconstruir l'història. La necessitat de resoldre les estrelles individualment limita l'estudi a les galàxies més properes ($\sim 1\text{Mpc}$) i suposa un gran esforç en quant a temps d'observació.

No obstant, amb el mètode presentat a l'article “*A new method to derive star formation histories of galaxies from their star cluster distributions*” (Maschberger & Kroupa 2007) no es requereix una resolució individual d'estrelles i es treballa exclusivament amb l'edat i la massa dels cúmuls en conjunt. Aquest fet ens permet ampliar la frontera i estudiar galàxies com M51 i M101 ($\sim 7\text{Mpc}$) amb el Hubble Space Telescope.

La història de la formació estel·lar (SFH) d'una galàxia es pot considerar dividida en èpoques de formació, i per cadascuna el cúmul més massiu es troba vinculat al rati de formació estel·lar (SFR).

2 Descripció del mètode

2.1 Relació massa màxima i rati de formació estel·lar (SFR)

El número de cúmuls en funció de la seva massa (Weidner & Kroupa, 2006) es pot obtenir a partir de:

$$\xi(M) = \frac{dN}{dM} = kM^{-\beta} \quad (1)$$

A on la constant k es troba determinada per la massa total M_{tot} , mínima M_{min} i màxima M_{max} .

$$k = \frac{M_{tot}(2-\beta)}{M_{max}^{2-\beta} - M_{min}^{2-\beta}} \quad (2)$$

- No es coneix amb exactitud quin és el limit de massa mínima per un cúmul, però s'assumirà $5M_{\odot}$ (i.e. cúmul a Taurus–Auriga).
- Tot i que existeixen estudis que situen el limit de massa màxim entre 0.5 i $2.5 \cdot 10^6 M_{\odot}$, s'utilitzarà $10^9 M_{\odot}$ per no limitar ratis de formació elevats.

La massa total es troba relacionada amb el rati de formació estel·lar (SFR) per un període de temps determinat (δt):

$$M_{tot} = SFR \cdot \delta t \quad (3)$$

Per altra banda, la densitat de probabilitat (Oey & Clarke 2005) de trobar un cúmul d'una massa màxima determinada es veu representada per:

$$\phi(M_{max}) = \left[\frac{1}{N_{tot}} \int_{M_{min}}^{M_{max}} \xi(M) dM \right]^{N_{tot}-1} \xi(M_{max}) \quad (4)$$

A on el nombre de cúmuls:

$$N_{tot}(M_{tot}) = \int_{M_{min}}^{M_{max}} M \xi(M) dM \quad (5)$$

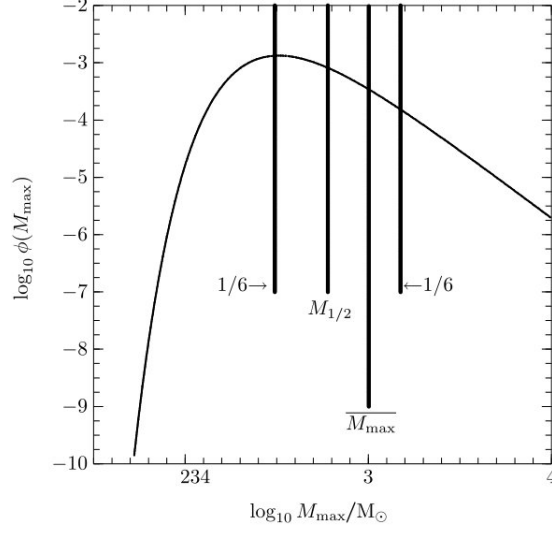


Figura 1: Distribució de M_{max} per a una població de $M_{tot} = 10^4 M_{\odot}$, $\beta = 2.4$ i $M_{min} = 5 M_{\odot}$. $\overline{M_{max}}$ es la mitja, mentre que $M_{1/2}$ és la mediana. Les línies $\frac{1}{6}$ delimiten la regió a on es trobarien $\frac{2}{3}$ de tots els cúmuls més massius

La distribució és asimètrica i la mitja es troba caracteritzada per:

$$\overline{M_{max}} = \int_{M_{min}}^{M_{max}} M'_{max} \phi(M'_{max}) dM'_{max} \quad (6)$$

Donat que la densitat de probabilitat $\phi(M_{max})$ depèn de M_{tot} (a través de ξ i N_{tot}) al igual que la mitja $\overline{M_{max}}$, mitjançant l'equació (3) és possible derivar la mitja $\overline{M_{max}}$ en dependència del rati de formació estel·lar SFR .

$$\overline{M_{max}} = f(SFR) \quad (7)$$

A la figura 2, a on es presenten dades observacionals reals, la mitja s'ha representat en línia continua utilitzant $\delta t = 10 Myr^1$ i $\beta = 2.4$ (Weidner et al., 2004). Les línies discontinues marquen les regions a on es trobarien $\frac{2}{3}$ de tots els cúmuls més massius.

¹A aquesta edat els cúmuls acostumen a arribar al pic de lluminositat.

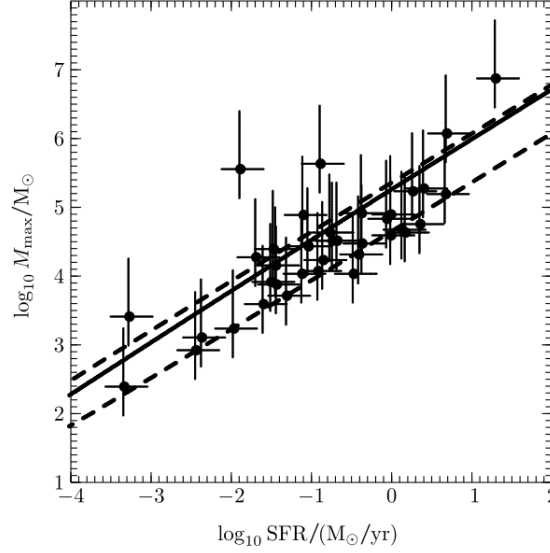


Figura 2: Masses dels cúmuls actuals més brillants respecte al rati actual de formació estel·lar. Dades observacionals de Larsen (2002), magnituds absolutes convertides a masses per Weidner et al. (2004).

2.2 Finestra temporal

Els estudis d'observació realitzats fins al moment han fet evident que:

- La lluminositat del cúmul més lluminós està relacionat amb el rati de formació estel·lar actual
- El cúmul més lluminós és habitualment el més jove i per tant, es pot considerar el més massiu de l'època de formació actual

No és possible utilitzar la relació (7) a partir d'un únic cúmul. No obstant, si es selecciona una finestra temporal que inclogui un conjunt d'èpoques de formació (considerant que SFR només canvia significativament a escales temporals superiors), llavors és possible calcular la massa màxima mitja $\overline{M_{max}}$ i fer la inversa:

$$SFR = f^{-1}(\overline{M_{max}}) \quad (8)$$

La finestra temporal ha de ser igual o superior a la longitud de la incertesa en la mesura de l'edat dels cúmuls (s'utilitzarà 0.5 i es desplaçara en passes de tamany δt).

$$\Delta \log(age/yr) = finestra \quad (9)$$

Aquest disseny fa que les formacions massives curtes d'estrelles per anys elevats no puguin ser detectats per aquest mètode.

2.2.1 Correcció per l'evolució dels cúmuls

La relació (8) és vàlida només per les masses inicials dels cúmuls, per tant s'ha de tenir en consideració l'evolució estel·lar i dinàmica dels cúmuls observats (p.ex. expulsió d'estrelles del cúmul per una pertorbació gravitacional).

El model de Lamers et al. (2005) per a la pèrdua de massa mitja:

$$M_i(t) = \left[\left(\frac{M}{M_\odot} \right)^\gamma + \frac{\gamma \cdot t}{t_0} \right]^\frac{1}{\gamma} \quad (10)$$

a on $\gamma = 0.62$ per qualsevol galàxia i $t_0 = \left(\frac{t_4}{660} \right)^\frac{1}{0.967}$ amb t_4 com a temps de dissolució d'un cúmul de $10^4 M_\odot$ (aquest ha sigut calculat per diverses galàxies).

2.2.2 Èpoques sense cúmuls observables

El nombre de cúmuls que es poden observar es redueixen considerablement per edats significatives (p.ex. més de 4 Gyrs). Quan per una època de formació es dona aquesta circumstància, la lluminositat límit de les observacions representa el límit superior del cúmul més massiu:

$$M_{lim}(t) = 1.6 \cdot 10^{9+0.4(Mag(t)-Mag_{lim})} M_{\odot} \quad (11)$$

a on Mag_{lim} és la magnitud límit i $Mag(t)$ és l'evolució de la lluminositat segons el model GALEV (Schulz et al. 2002). A aquesta equació, caldrà aplicar la correcció per l'evolució del cúmul (10) considerant M_{lim} .

Com a límit inferior es considerarà que no hi ha hagut formació estel·lar per aquesta època $M_{max} = 0$.

2.3 Proves amb poblacions de cúmuls estel·lars sintètics

S'han generat poblacions de cúmuls estel·lars per a èpoques de formació estel·lar de $10Myrs$ fins arribar als $10Gyrs$.

2.3.1 SFR constant i sense incertesa a les edats

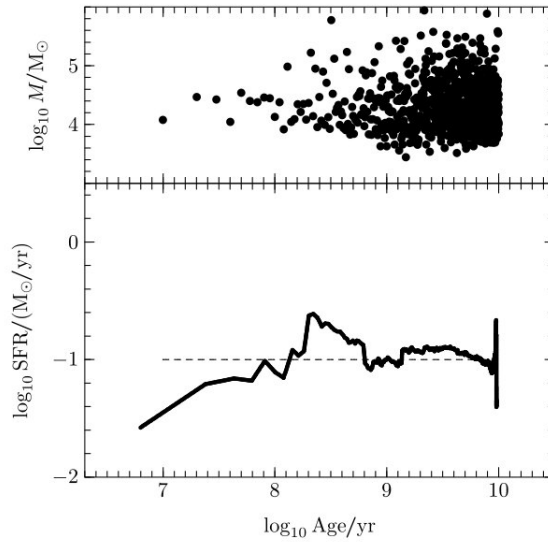


Figura 3: SFR constant i sense incertesa a la determinació de les edats (línia discontinua). Reconstrucció de la historia (SFH) en línia continua.

Cal destacar que a la imatge superior apareixen els cúmuls principalment entre 9 i 10 per l'efecte del logaritme. Per edats més joves hi ha una desviació important degut a que la finestra $\Delta \log(age/yr) = 0.5$ conté poques èpoques de $10Myrs$ en aquesta zona. Mentre que a partir de $10Gyrs$ apareixen unes variacions brusques que són degudes a la reducció de la finestra al arribar al final de la mostra. La resta s'aproxima a la SFR original.

2.3.2 SFR constant amb evolució de cúmuls i limit observacional

A banda d'aplicar un SFR constant sense incertesa en l'edat, s'ha considerat l'evolució dels cúmuls amb $t_4 = 7.9 \cdot 10^9 yr$ (Boutloukos & Lamers, 2003) i un límit observacional de $Mag_{lim} = -3.5mag$ al visible.

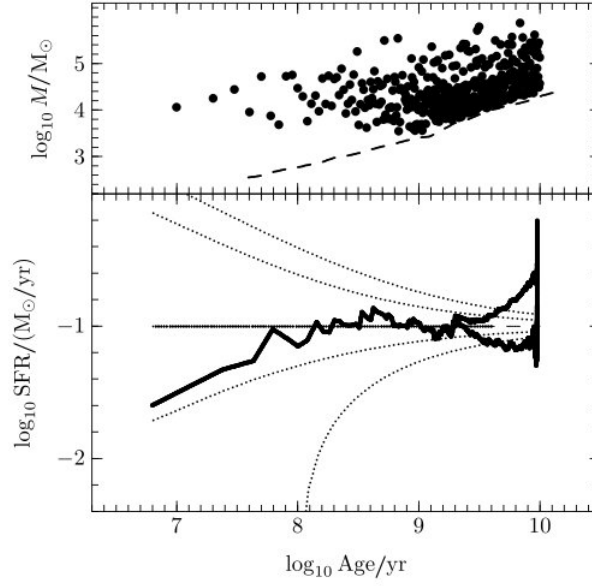


Figura 4: SFR constant amb evolució de cúmuls i límit observacional. Reconstrucció de la història (SFH) en línia contínua. Cal destacar que les línies discontinues corresponen al criteri exposat a la secció a la pàgina 8.

Els resultats són similars a l'apartat anterior, però en aquest cas apareixen èpoques de formació sense cúmuls per edats avançades. A partir d'aquest punt es mostren dos branques:

- Límit superior: per a les èpoques de formació sense cúmuls, es considera que existeix un cúmul que està just per sota del límit observacional.
- Límit inferior: es considera que no hi ha hagut formació ($\text{SFR}=0$) per a les èpoques de formació sense cúmuls (al fer el promig amb la resta d'èpoques de la finestra, l'SFR decreix).

El vertader SFH es troba entre els dos límits.

2.3.3 SFR variable

S'ha aplicat una SFR variable i incertesa en les edats obtingudes a partir d'una Gaussiana amb variances $\sigma_\tau = 0.15 \text{ dex}$ (descartant i regenerant aquelles superiors a 0.5).

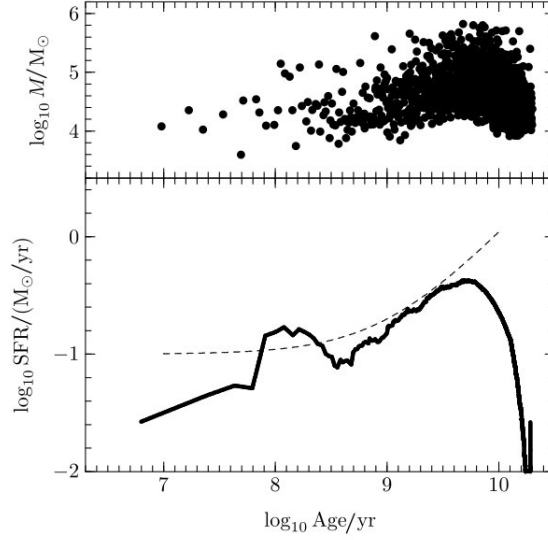


Figura 5: SFR variable amb incertesa a les edats de $\sigma_\tau = 0.15dex$ en línia discontinua. Reconstrucció de la història (SFH) en línia continua.

La incertesa fa que decremanti la SFH per edats avançades donat que hi haurà cúmuls que la seva edat es desviarà cap als $10Gyrs + 0.5$. Per a la resta apliquen els mateixos comentaris que a l'apartat anterior.

2.3.4 SFR variable amb ràfegues

S'ha aplicat una SFR variable amb 3 ràfegues de 200 Myrs (increments de factor 10) i incertesa en les edats obtingudes a partir d'una Gaussiana amb variança $\sigma_\tau = 0.15dex$ (descartant i regenerant aquelles superiors a 0.5).

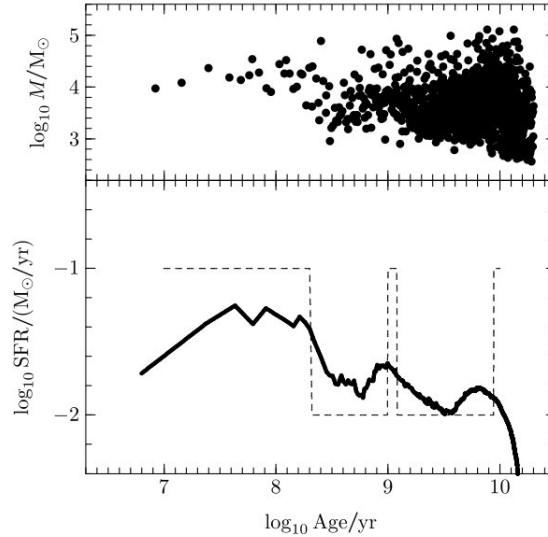


Figura 6: SFR variable amb incertesa a les edats de $\sigma_\tau = 0.15dex$ en línia discontinua. Reconstrucció de la història (SFH) en línia continua.

Els pics de la SFH gairebé coincideixen amb les ràfegues, a excepció de la darrera que es veu afectada pel mateix efecte que el comentat a l'apartat anterior.

2.4 Criteri de detecció de variacions

Per tal de diferenciar canvis significatius a l'SFH que no han sigut produïts per efectes propis del mètode, s'ha realitzat un estudi estadístic amb 1.000 poblacions de cúmuls per acabar definint el rati de formació promig com la integral de la història reconstruïda dividida pel temps:

$$\langle SFR \rangle = \frac{1}{\Delta\tau} \int_{\tau_{min}}^{\tau_{max}} SFH \quad (12)$$

A on τ_{max} i τ_{min} és el temps màxim i mínim lleugerament desplaçats per tal de no incloure els efectes observats als casos anteriors de cúmuls molt joves o molt antics (criteri: el límit superior i l'inferior comencen a diferir per més de 0.2).

Llavors s'estableix com hipòtesis nul·la que la SFR ha sigut constant i el seu valor és $\langle SFR \rangle$ amb una desviació de:

$$\sigma_{SFR\pm}(\tau) = \hat{\sigma}_{SFR\pm}(\tau) \cdot SFR(\tau) \quad (13)$$

a on:

$$\hat{\sigma}_{SFR+} = \frac{45}{1 + e^{1.3(\log_{10}(\tau) - 5.4)}} \quad (14)$$

$$\hat{\sigma}_{SFR-} = \frac{1}{1 + e^{1.2(\log_{10}(\tau) - 8.0)}} \quad (15)$$

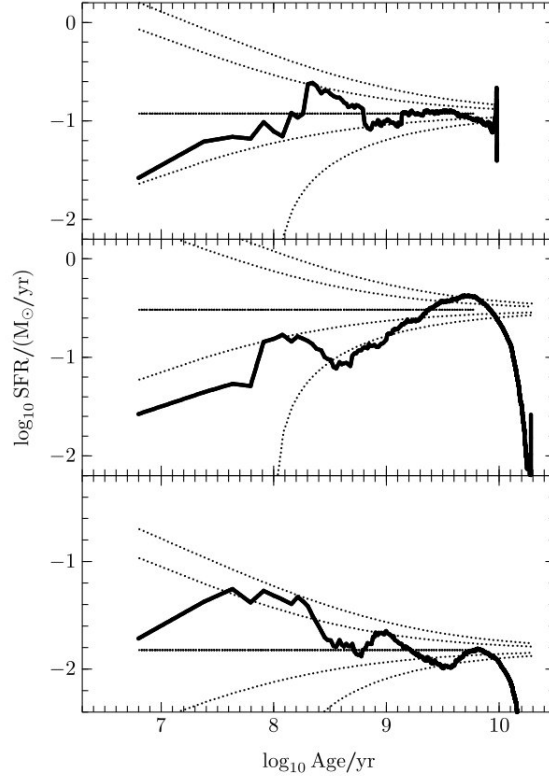


Figura 7: Reconstrucció SFH (línia continua) per SFR lineal, creixent i amb ràfegues. En línia discontinua hipòtesis nul·la de SFH constant $\langle SFR \rangle$ i desviacions $1\sigma_{SFR\pm}$ i $2\sigma_{SFR\pm}$

La hipòtesis nul·la (SFR constant) no serà vàlida quan la SFH reconstruïda superi significativament el límit definit per $1\sigma_{SFR\pm}$. Aquest criteri facilita la diferenciació dels efectes del mètode de la SFH real.

3 Història de la formació estel·lar del gran núvol de Magallanes

A l'article “*The star formation history of the Large Magellanic Cloud as seen by star clusters and stars*” (Maschberger & Kroupa 2010), s’ha estudiat el gran núvol de Magallanes mitjançant dos mètodes:

- Utilitzant els cúmuls més massius per a cada època de formació.
- Fent ús de la totalitat dels cúmuls, tot i que aquesta opció implica una major limitació en el rang d’edats fins a les que es pot arribar.

Per altra banda, s’han comparat aquests resultats amb l’història de formació estel·lar obtinguda a partir del diagrama color-magnitud.

3.1 Dades

Les edats i masses dels cúmuls utilitzats han sigut obtinguts de Grijs & Anders (2006), que van re-analitzar la fotometria de Hunter et al. (2003), que a la vegada es va basar en les observacions de Massey (2002).

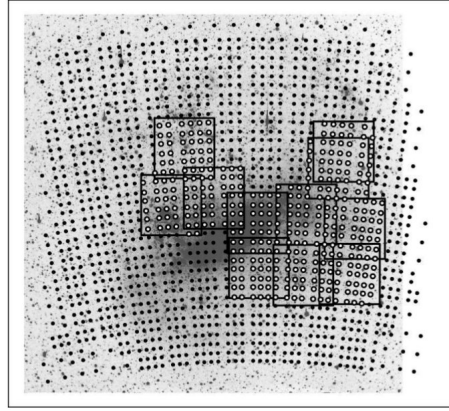


Figura 8: Gran núvol de Magallanes. Els punts blancs corresponen a les regions seleccionades per les quals es disposa d’edats i masses (de Grijs & Anders 2006) i SFH mitjançant diagrames color-magnitud (Harris & Zaritsky 2009).

Cal destacar que pel càlcul de la massa inicial Grijs & Anders (2006) només van tenir en compte l’evolució estel·lar. Per tant, s’han afegit els efectes de l’evolució dinàmica mitjançant la formulació de Lamers et al. (2005), a partir de la combinació de les correccions exposades a la secció 2.2.1 i a la secció 2.2.2:

$$M_{ini} = \left[\left(\frac{M(t)}{M_{\odot}} \right)^{0.62} + \frac{0.62 \cdot t}{(t_4/660)^{1.034}} \right]^{1.61} \quad (16)$$

amb $t_4 = 8Gyr$ segons Grijs & Anders (2006), tot i que també s’ha utilitzat $t_4 = 1Gyr$ per comparació.

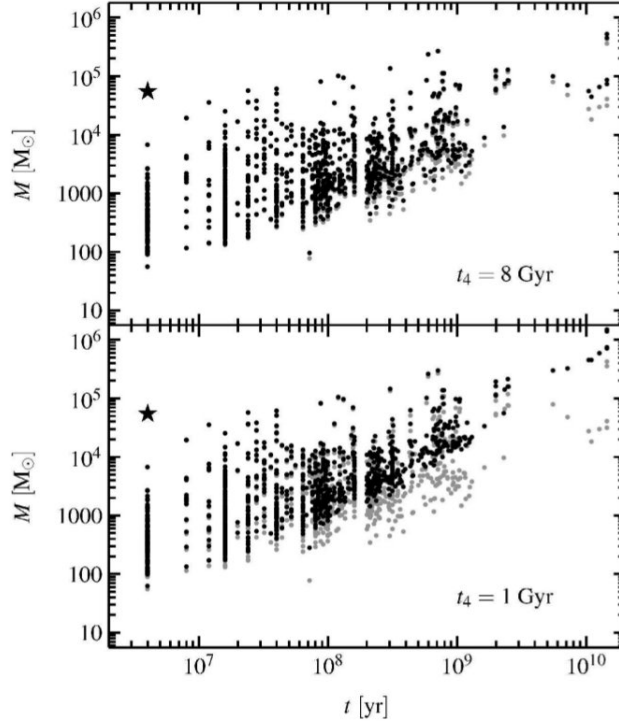


Figura 9: Diagrama massa-edats. Els cercles grisos són les masses inicials calculades per Grijs & Anders (2006) tenint en compte l'evolució estel·lar, els negres són les masses considerant també els efectes de l'evolució dinàmica.

De la figura 9 es poden realitzar diverses reflexions:

1. Degut a l'ús d'isòcrones² discretes, els cúmuls s'acaben agrupant en columnes de la mateixa edat.
2. Els cúmuls de massa més petita es redueixen per edats superiors a causa del límit observacional (menys luminositat).
3. A $\log_{10}(\tau) = 6.6$ i $\log_{10}(\tau) = 7.2$ es situen dues llargues densitats de cúmuls originat pel mètode d'obtenció de les edats. No obstant, no afectaran a la determinació de SFH.
4. Entre $\log_{10}(\tau) = 9.5$ i $\log_{10}(\tau) = 10.1$ es troba el conegut forat de cúmuls del LMC.
5. Entre $2.8 \leq \log_{10}(\tau) \leq 3.40$ i $7.8 \leq \log_{10}(\tau) \leq 8$ existeix una sobredensitat que podria haver estat originada per interaccions amb el núvol petit de Magallanes.
6. L'estrella representa el cúmul R136, el més massiu ($5.5 \cdot 10^4 M_{\odot}$) recentment format i que ha sigut inclòs a les dades analitzades.

En total es disposa de 992 cúmuls amb masses i edats mesurades amb una incertesa $\Delta \log_{10}(\tau/yr) \leq 0.35$.

²Línies a on es situen cúmuls de diferents masses però igual edat en un diagrama HR.

3.2 Cúmul més massius

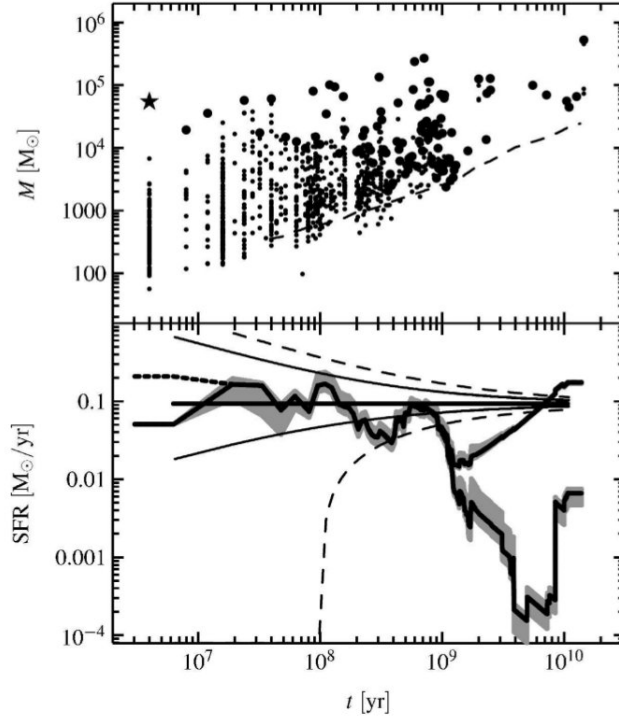


Figura 10: Al primer diagrama es mostren tots els cúmul amb les seves masses inicials. Al segon diagrama es mostra la SFH en línia negra continua, amb la incertesa en la massa a la zona gris. La divisió en dos línies es produeix quan comencen a haver-hi moltes èpoques sense cúmul i es calcula el límit superior (límit observacional) e inferior ($M_{max} = 0$). La línia horitzontal correspon a una SFR constant de $\langle SFR \rangle$ amb desviacions 1σ i 2σ .

Com a reflexions sobre el resultat:

- Per edats inferiors a 100 Myr no es fàcil saber si les variacions son degudes a efectes del mètode o a variacions al SFR.
- Des dels 100 Myr fins als 1 Gyr es desvia aproximadament 2σ de la constant, sembla ser causat per un decreixement al SFR.

3.3 Població total de cúmul

LMC és troba suficientment aprop com per poder mesurar un gran número de cúmul de diferents edats (no només els més massius). Per tant, es possible aplicar el mateix mètode però utilitzant la massa total.

$$\widetilde{SFR}(t, M_c) = \frac{1}{\Delta t} \sum_{M_i > M_c} M_i \quad (17)$$

a on M_i és la massa del cúmul número i amb edat $t(M_i) \epsilon \Delta t$, i M_c és la massa màxima no observable.

No obstant, com les observacions no inclouen les masses més baixes, s'ha d'extrapolar el resultat:

$$SFR(t, M_c) = a(M_c) \widetilde{SFR}(t, M_c) \quad (18)$$

a on $\xi = M^{-\beta}$ és una funció de masses per cúmul (similar a l'exposada a la secció 2.1) i el factor normalitzador:

$$a(M_c) = \frac{\int_{M_1}^{M_u} M \xi dM}{\int_{M_c}^{M_u} M \xi dM} \quad (19)$$

per M_l i M_u com a massa límit inferior i superior d'un cúmul respectivament.

La història de la formació estel·lar (SFH) s'obté movent un interval de temps constant a nivell logarítmic ($\log(\Delta t) = 0.35dex$) en passes de $1Myr$ fins arribar als $400Myr$ (més enllà el nombre de cúmuls és massa petit com per obtenir resultats fiables).

Al igual que el mètode anterior, les masses han sigut corregides per considerar els efectes de l'evolució dinàmica (seccions 2.2.1 i 2.2.2) amb $t_4 = 8Gyr$.

Respecte a la resta de paràmetres, els autors de l'estudi (Maschberger & Kroupa 2010) realitzen diverses proves per acabar decantant-se per una M_c variable en funció de l'edat, $M_l = 100M_\odot$, $M_u = 10^6M_\odot$ i $\beta = 2$.

En quant a la SFH resultant, s'exposa a la següent secció conjuntament amb la resta de mètodes.

3.4 Comparació amb la SFH obtinguda a partir de diagrames color-magnitud

Com a història de formació estel·lar a partir de diagrames color-magnitud (d'ara en endavant també CMD per les sigles en anglès "Color-Magnitude Diagram") s'han utilitzat els resultats del treball de Harris & Zaritsky (2009) amb 10^{24} estrelles de LMC.

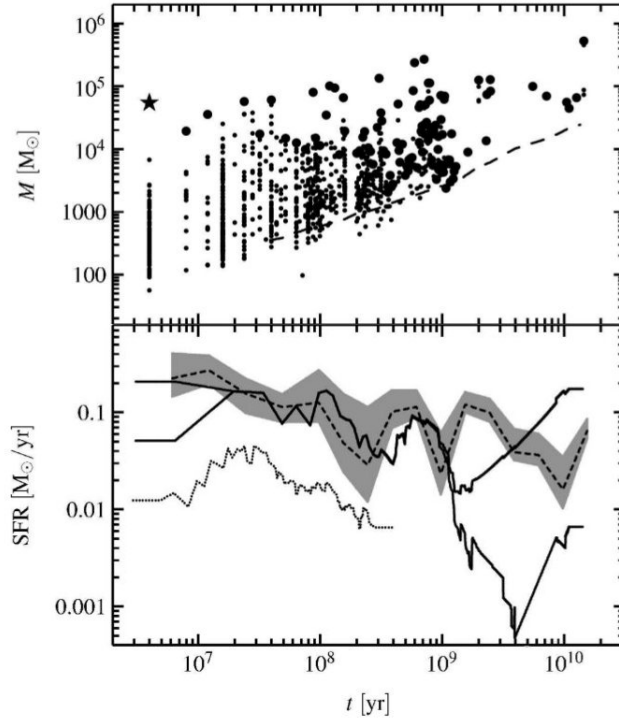


Figura 11: SFH a partir de diagrames color-magnitud en línia discontinua amb la zona d'incertesa en gris. La línia continua correspon a la SFH utilitzant cúmuls de massa màxima (secció 3.2). Finalment, la línia de punts és la SFH resultant de l'ús de la totalitat de la població de cúmuls (secció 3.3).

Com a reflexions sobre el resultats:

- La reconstrucció de SFH amb cúmuls de massa màxima coincideix significativament amb el resultat del mètode CMD fins a 1Gyr, tot i que es troba lleugerament desplaçat.
 - És possible que el desplaçament es pogués limitar si es millorés la incertesa en les edats i, en conseqüència, es reduís la finestra utilitzada.
- Des de els 10-20 Myr fins els 200 Myr la SFH del mètode que utilitza la totalitat de cúmuls coincideix amb els altres dos. No obstant, es troba a un nivell 10-20% per sota. Això podria ser degut a dos alternatives:
 - Només un fragment de les estrelles de la galàxia es formen en cúmuls.

- Existeixen violentes dissolucions de cúmuls (mortalitat molt primerenca del 80-90%).
- A partir de 1 Gyr, hi ha masses forats sense cúmuls i el mètode del cúmul de massa màxima presenta una SFH màxima i mínima.
 - Entre 1 Gyr i 10 Gyr, és rellevant que la SFH del mètode CMD es troba significativament per sobre del límit màxim quan, aparentment, la quantitat de cúmuls observats en aquesta franja i les seves masses haurien de ser superiors per produir un pic tan elevat.
 - Per altra banda, és probable que a partir dels 10Gyr hi hagués una elevada formació estel·lar, donat que tant el límit superior com l'inferior creixen i coincideixen amb l'existència de cúmuls molt massius.

4 Conclusions

A mode de resum esquemàtic i general, el nou mètode basat en cúmuls de massa màxima presenta els següents principals punts forts:

- Al no ser necessari resoldre les estrelles de forma individual:
 - Es poden analitzar galàxies més llunyanes.
 - Requereix menys esforç observacional.
- Les proves realitzades fins al moment demostren una coincidència significativa amb el mètode dels diagrames color-magnitud pel primer 1 Gyr.

Per altra banda, també s'han de valorar les contrapartides:

- No permet detectar ràfegues ràpides i massives de formació estel·lar.
- Per a edats avançades, no sempre és possible observar cúmuls per cada època de formació, fet que prova que el mètode quedi reduït a presentar un límit màxim i mínim de la història de formació estel·lar per aquesta franja.

Referències

- [1] Maschberger & Kroupa (2007). A new method to derive star formation histories of galaxies from their star cluster distributions. MNRAS 379, 34–42 (2007).
- [2] Maschberger & Kroupa (2010). The star formation history of the Large Magellanic Cloud as seen by star clusters and stars. MNRAS 000, 1–9 (2010).