

Recopilación y ajuste de edades de cúmulos estelares de las Nubes de Magallanes

M.I. Tapia-Reina^{1,2}, F.O. Simondi-Romero^{1,2}, A.V. Ahumada^{2,3}, L.R. Vega-Neme^{2,4}, J.H. Minniti⁵,
C.G. Oviedo^{3,6} & J.J. Clariá^{2,3}

¹ Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación, UNC, Argentina

² Observatorio Astronómico de Córdoba, UNC, Argentina

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina

⁴ Instituto de Astronomía Teórica y Experimental, CONICET-UNC, Argentina

⁵ Nicolaus Copernicus Astronomical Center, Polish Academy of Sciences, Polonia

⁶ Instituto de Astronomía y Física del Espacio, CONICET-UBA, Argentina

Contacto / federico.simondi.romero@unc.edu.ar

Resumen / Tanto la edad como la metalicidad de cúmulos estelares se pueden determinar a partir de los anchos equivalentes de perfiles espectrales medidos sobre sus espectros integrados. En este trabajo se presenta una nueva calibración edad-ancho equivalente, con la cual se actualizan las edades de más de cincuenta cúmulos estelares de las Nubes de Magallanes. Todos los espectros integrados fueron obtenidos como parte de un programa que se está llevando a cabo en el Complejo Astronómico El Leoncito (San Juan, CASLEO) desde hace más de 20 años.

Abstract / Both age and metallicity of stellar clusters can be determined from equivalent widths of the spectral profiles measured in their integrated spectra. In this article a new age-equivalent width calibration is presented, and the ages of more than fifty star clusters in the Magellanic Clouds are updated. All the integrated spectra were obtained as part of a program carried out at the Complejo Astronómico El Leoncito (San Juan, CASLEO) for more than 20 years.

Keywords / Magellanic Clouds — galaxies: clusters: general — techniques: spectroscopic

1. Introducción

En la última década, se han determinado parámetros astrofísicos de casi un centenar de cúmulos estelares (CEs) de las Nubes de Magallanes (NMs) (Minniti et al. 2014, M14; Ahumada et al. 2016, A16; Ahumada et al. 2019, A19) utilizando la técnica de espectroscopía integrada, algunos de ellos determinados por primera vez (Oviedo & Ahumada 2020, OA20; Simondi-Romero 2021, SR21; Tapia-Reina et al. 2023, TR23). Al mismo tiempo, se han identificado nuevos CEs de las NMs (Bica et al. 2008), lo que demuestra la necesidad de disponer de herramientas que permitan obtener cada vez mejores resultados en menor tiempo.

La espectroscopía integrada (Bica & Alloin 1986a) permite estudiar conglomerados distantes de pequeño diámetro angular, tales como CEs de las NMs, de nuestra Galaxia e incluso de galaxias lejanas en las cuales, debido a la distancia, sólo es posible la aplicación de dicha técnica. Por otra parte, la determinación de los anchos equivalentes (AEs) de perfiles espectrales en espectros integrados es muy importante, dado que los mismos permiten estimar la edad y la metalicidad de los CEs (Bica & Alloin 1986b; Santos & Piatti 2004, SP04).

Recientemente, Simondi-Romero et al. (2022, SR22) advirtieron que al determinar edades de CEs de las NMs a partir de ajustes obtenidos en espectros de cúmulos abiertos (CAs), puede incurrirse en un error en la estimación de éstas. En este trabajo, se cuantifica este error,

a partir de la comparación de edades de CEs de las NMs obtenidas según dos ajustes distintos.

2. Datos usados y procedimiento realizado

Los datos de los AEs (en Å) y edades utilizados en este trabajo han sido recopilados de las muestras de CEs de las NMs de M14, A16, A19, OA20, SR21, Tapia-Reina et al. 2022a (TR22a), Tapia-Reina et al. 2022b (TR22b) y TR23. Luego, se definen los parámetros Sm y Sh (en Å) como la suma de los AEs de las líneas y perfiles metálicos y de las líneas de Balmer ($H\beta$, $H\gamma$ y $H\delta$), respectivamente.

A partir de espectros integrados de CAs y CEs de las NMs, SP04 presentaron una calibración en edad para estos objetos en función de los parámetros Sm y Sh . El ajuste de Sm en función de la edad da lugar a la siguiente ecuación:

$$Sm = 13.88 (\pm 0.20) + 10.32 (\pm 0.35) \times \log(edad) + 2.53 (\pm 0.18) \times \log^2(edad), \quad (1)$$

con una $rms = 2.9$, mientras que el correspondiente ajuste de Sh resulta:

$$Sh = 23.32 (\pm 0.20) - 8.56 (\pm 0.35) \times \log(edad) - 6.35 (\pm 0.18) \times \log^2(edad), \quad (2)$$

Cúmulos estelares de las Nubes de Magallanes

Tabla 1: Edades obtenidas en este trabajo para la muestra de CEs (en 10^9 años).

Nombre	Edad de referencia	Edad SP04			Edad nuevo ajuste			Ajuste con menor error
		<i>Sm</i>	<i>Sh1</i>	<i>Sh2</i>	<i>Sm</i>	<i>Sh1</i>	<i>Sh2</i>	
NGC 1693	0.02	0.02	0.01	5.50	0.02	0.01	13.60	SR22
NGC 1695	0.06	0.11	0.04	1.14	0.12	0.10	1.33	SP04
NGC 1698	0.02	0.05	0.03	1.57	0.06	0.05	2.54	SP04
NGC 1704	0.03	0.11	0.02	2.63	0.12	0.02	6.13	SR22
NGC 1711	0.05	0.01	0.02	2.90	0.01	0.02	7.16	SR22
NGC 1755	0.09	0.03	0.03	1.57	0.03	0.05	2.54	SR22
NGC 1772	0.03	0.02	0.01	3.70	0.02	0.01	10.45	SP04
NGC 1782	0.05	0.02	0.02	2.72	0.02	0.02	6.47	SR22
NGC 1793	0.05	0.22	0.03	1.77	0.24	0.04	3.17	SR22
NGC 1805	0.02	0.02	0.01	4.27	0.02	0.01	12.97	SP04
NGC 1815	0.02	0.04	0.03	1.44	0.04	0.06	2.16	SP04
NGC 1818	0.03	0.02	0.01	4.21	0.02	0.01	12.70	SP04
NGC 1847	0.07	0.03	0.02	2.81	0.03	0.02	6.81	SR22
NGC 1890	0.05	0.15	0.03	1.44	0.17	0.06	2.16	SR22
NGC 2095	0.05	0.05	NaN	NaN	0.06	NaN	NaN	SP04
NGC 2160	0.10	0.05	0.05	0.98	0.06	0.16	0.87	SR22
SL 106	0.02	0.01	0.01	3.09	0.01	0.02	7.91	SR22
SL 134	0.01	0.02	0.01	5.79	0.02	0.01	13.60	SP04
SL 142	0.24	0.29	NaN	NaN	0.31	NaN	NaN	SP04
SL 256	0.03	0.01	0.02	2.18	0.01	0.03	4.51	SR22
SL 425	0.03	0.01	0.01	3.65	0.01	0.01	10.22	SR22
SL 428	0.00	0.01	0.01	8.38	0.01	0.00	13.60	SR22
SL 498	0.01	0.02	0.01	6.01	0.01	0.01	13.60	SR22
SL 516	0.01	0.01	0.01	6.24	0.01	0.01	13.60	SR22
SL 543	0.10	0.04	0.03	1.41	0.04	0.07	2.07	SR22
SL 624	0.11	0.03	0.10	0.46	0.03	NaN	NaN	SP04
NGC 1466	1.41	0.68	0.01	4.64	0.67	0.01	13.60	SP04
NGC 1696	0.48	0.42	NaN	NaN	0.44	NaN	NaN	SR22
NGC 1702	0.04	0.24	NaN	NaN	0.27	NaN	NaN	SP04
NGC 1751	0.36	1.22	0.10	0.43	1.04	NaN	NaN	SP04
NGC 1756	0.10	0.08	0.08	0.55	0.09	NaN	NaN	SR22
NGC 1777	0.52	0.56	NaN	NaN	0.56	NaN	NaN	SP04
NGC 1783	1.51	1.71	0.03	1.77	1.28	0.04	3.17	SP04
NGC 1849	0.19	0.33	NaN	NaN	0.36	NaN	NaN	SP04
NGC 1859	0.08	0.11	0.04	1.09	0.12	0.12	1.17	SP04
NGC 1887	0.12	0.05	NaN	NaN	0.06	NaN	NaN	SR22
NGC 1897	0.63	0.77	NaN	NaN	0.73	NaN	NaN	SR22
NGC 1905	0.51	0.14	NaN	NaN	0.16	NaN	NaN	SR22
NGC 1978	2.51	2.40	0.01	3.65	1.50	0.01	10.22	SP04
NGC 2166	0.49	0.29	NaN	NaN	0.31	NaN	NaN	SR22
NGC 2181	0.48	0.73	NaN	NaN	0.71	NaN	NaN	SR22
NGC 2197	0.63	1.61	NaN	NaN	1.23	NaN	NaN	SR22
SL 230	0.04	0.02	0.01	4.15	0.02	0.01	12.44	SP04
NGC 176	0.03	0.04	0.02	2.77	0.04	0.02	6.64	SR22
Kron 17	0.29	0.16	NaN	NaN	0.17	NaN	NaN	SR22
HW 22	5.94	1.41	0.01	8.67	1.14	0.00	13.60	SP04
Kron 27	9.05	5.48	0.03	1.30	1.13	0.08	1.75	SP04
Bruck 50	0.00	0.01	0.00	14.42	0.01	0.00	13.60	SR22
SL 164	0.46	1.41	0.02	2.60	1.14	0.02	0.01	SR22
SL 396	0.89	5.62	0.01	3.09	1.03	0.02	7.91	SR22
SL 598	1.39	1.16	0.05	0.85	1.00	0.34	0.41	SP04
SL 749	0.26	5.77	NaN	NaN	0.55	NaN	NaN	SR22
SL 820	0.10	5.81	NaN	NaN	0.80	NaN	NaN	SR22
NGC 1766	0.05	0.00	0.01	3.29	0.00	0.02	8.70	SR22
NGC 1801	0.20	0.00	0.05	0.97	0.00	0.16	0.84	SR22
NGC 2000	0.10	0.00	0.03	1.80	0.00	0.04	3.24	SR22
NGC 2051	0.20	0.00	0.14	0.32	0.00	NaN	NaN	SP04
NGC 2088	0.03	0.04	0.01	4.48	0.05	0.01	13.60	SP04
NGC 2123	0.10	0.02	0.02	2.05	0.02	0.03	4.06	SR22
NGC 2127	0.10	0.01	0.02	1.82	0.01	0.04	3.31	SR22
SL 105	0.08	0.02	0.04	1.04	0.01	0.13	1.03	SP04
NGC 2116	0.08	0.02	0.05	0.95	0.02	0.17	0.80	SP04

Tabla 1: Continuación

Nombre	Edad de referencia	Edad SP04			Edad nuevo ajuste			Ajuste con menor error
		<i>Sm</i>	<i>Sh1</i>	<i>Sh2</i>	<i>Sm</i>	<i>Sh1</i>	<i>Sh2</i>	
NGC 2138	0.31	0.02	0.03	1.41	0.02	0.07	2.07	SR22
NGC 1733	0.31	0.22	NaN	NaN	0.24	NaN	NaN	SR22
NGC 1867	0.40	0.03	0.01	8.77	0.03	0.00	13.60	SP04
Lindsay 41	0.00	0.02	0.00	9.58	0.02	0.00	13.60	SP04
NGC 1826	0.50	0.68	0.10	0.46	0.67	NaN	NaN	SP04
SL 573	1.00	1.08	0.02	3.00	0.95	0.02	7.53	SR22
NGC 1946	0.04	0.04	0.01	3.14	0.04	0.02	8.10	SR22
NGC 2100	0.01	0.05	0.00	9.58	0.06	0.00	13.60	SP04
NGC 2145	1.00	0.05	NaN	NaN	0.06	NaN	NaN	SR22
NGC 1866	0.01	1.15	0.00	11.62	0.99	0.00	13.60	SP04
NGC 2109	0.01	0.44	0.01	5.16	0.46	0.01	13.60	SR22
NGC 2140	0.01	2.79	0.01	4.51	1.57	0.01	13.60	SR22
NGC 1718	0.01	1.71	0.01	5.86	1.28	0.01	13.60	SR22

con una $rms = 4.8$, siendo ambos ajustes válidos en el intervalo $-2.4 < \log(edad) < 0.8$.

Por otra parte, SR22 realizaron un nuevo ajuste de Sm y de Sh en términos de edad, aunque teniendo en cuenta sólo CEs de las NMs. En sincronía con este ajuste y utilizando los AEs de los CEs estudiados por A16, A19, SR21 y TR22a, se redeterminaron nuevos coeficientes para las ecuaciones (1) y (2). Con estos nuevos valores, se redefinieron los ajustes para la determinación de edades a partir de Sm y Sh , dando lugar a las siguientes ecuaciones:

$$\log(edad) = -2.26 (\pm 0.13) + 0.22 (\pm 0.03) \times Sm - 0.0048 (\pm 0.0009) \times Sm^2, \quad (3)$$

$$\log(edad) = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4 \times a \times (c - Sh)}}{2 \times a}, \quad (4)$$

donde $a = -3.56 (\pm 0.77)$, $b = -3.08 (\pm 1.67)$ y $c = 23.23 (\pm 1.29)$ y valores rms 0.43 y 4.7, respectivamente.

Para poder determinar las edades de todos los CEs de la muestra, se confeccionó un programa en *ForTran* con el cual se calcularon no solo las edades empleando las ecuaciones (1), (2), (3) y (4), sino que también se estimaron los errores relativos obtenidos de cada ajuste. En la Tabla 1 se presentan las edades de referencia, edades obtenidas con los ajustes de SP04 y aquéllas obtenidas en este trabajo. En el caso de las ecuaciones (2) y (4) el resultado es bivaluado ($Sh1$ y $Sh2$). En la última columna se destaca el ajuste que provee el menor error relativo.

3. Breve discusión y perspectivas futuras

A partir del análisis de los resultados obtenidos, se concluye que la relación edad-AE para CEs de las NMs no sería la misma que para los CEs de nuestra Galaxia, tal como sugiere SR22. Esto parecería indicar que los CEs de las NMs no presentan el mismo comportamiento que los CAs.

Por otra parte se observa que, en el caso de los CEs jóvenes, un pequeño error en la elección de uno u otro ajuste puede dar lugar a un elevado error relativo. Al

analizar las edades determinadas por otros métodos, tales como *STARLIGHT* (SR21) o *FISA* (TR23), en relación a las obtenidas en este trabajo, puede verse que en todos los casos se obtienen valores comparables. En particular, algunos de los nuevos valores encontrados presentan mayor precisión que la obtenida por el ajuste de SP04, por lo que se recomienda utilizar este nuevo ajuste.

Como perspectiva futura se espera poder examinar la o las razones por las cuales se obtuvieron estas notables diferencias entre los ajustes presentados. Si bien se sabe que el comportamiento de los CEs de las NMs y de nuestra Galaxia no parece ser el mismo, sería revelador poder describir y desarrollar las causas astrofísicas de este hecho.

Agradecimientos: Este trabajo está basado en datos obtenidos en el Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO), operado sobre la base de un acuerdo entre el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de la República Argentina y las Universidades Nacionales de La Plata, Córdoba y San Juan. Los autores agradecen el valioso aporte del CASLEO y de sus operarios, tanto como el del OAC y su personal, por permitir a algunos de nosotros desarrollarnos como investigadores. MITR agradece a FaMAF por el apoyo económico recibido. MITR y FOSR agradecen al COL por la ayuda económica recibida.

Referencias

- Ahumada A.V., et al., 2016, PASP, 128, 094101 (A16)
 Ahumada A.V., et al., 2019, PASP, 131, 024101 (A19)
 Bica E., Alloin D., 1986a, A&A, 162, 21
 Bica E., Alloin D., 1986b, A&AS, 66, 171
 Bica E., et al., 2008, MNRAS, 389, 678
 Minniti J.H., et al., 2014, A&A, 565, A49 (M14)
 Oviedo C.G., Ahumada A.V., 2020, BAAA, 61B, 57 (OA20)
 Santos J. F. C. J., Piatti A.E., 2004, A&A, 428, 79 (SP04)
 Simondi-Romero F.O., 2021, Trabajo Especial de Licenciatura, FaMAF, UNC (SR21)
 Simondi-Romero F.O., Ahumada A.V., Vega-Neme L.R., 2022, Boletín IV JAE, enviado (SR22)
 Tapia-Reina M.I., Simondi-Romero F.O., Ahumada A.V., 2022a, Boletín IV JAE, enviado (TR22a)
 Tapia-Reina M.I., Simondi-Romero F.O., Ahumada A.V., 2022b, BAAA, 63, 127 (TR22b)
 Tapia-Reina M.I., Simondi-Romero F.O., Ahumada A.V., 2023, BAAA64, enviado (TR23)