

Estrellas variables tipo RR Lyrae y efecto Blazhko

Carlos Eugenio Tapia Ayuga

1 de junio de 2010

Resumen

En este *paper* comenzaremos con una introducción sobre los tipos fundamentales de estrellas variables que nos podemos encontrar, para más tarde introducirnos de lleno en el estudio de las RR Lyrae. Las estrellas RR Lyrae son básicas en la medición de distancias entre galaxias del Grupo Local ya que se caracterizan por una gran regularidad en su brillo. Sin embargo, una vez se estudian en profundidad, estas estrellas presentan una modulación en su amplitud, efecto Blazhko, debida a un modo de pulsación oblicuo. Esta modulación podría deberse a distintas edades entre una estrella y otra, diferentes metalicidades o entornos en el que se encuentren, pero comprobaremos como este efecto es independiente de todos estos factores y sólo se debe al modo en que pulsa la estrella.

Introducción

Como ya he adelantado, en este artículo trataremos el comportamiento de las estrellas variables de tipo RR Lyrae, si bien gran parte de las estrellas variables tienen un comportamiento muy regular e inclusive simétrico, como es el caso de las cefeidas. Las estrellas objeto de nuestro estudio tienen una curva totalmente asimétrica, como veremos más adelante, con una subida muy brusca de intensidad para después ir decreciendo de una forma muy suave. Además, una vez estudiemos los gráficos podremos ver como existe un pequeño mínimo justo antes del incremento de magnitud que va variando con el tiempo. Struve ya estudió este efecto en 1948 pero hasta la actualidad no se ha llegado a una comprensión total de qué produce esta bajada de luminosidad antes del máximo.

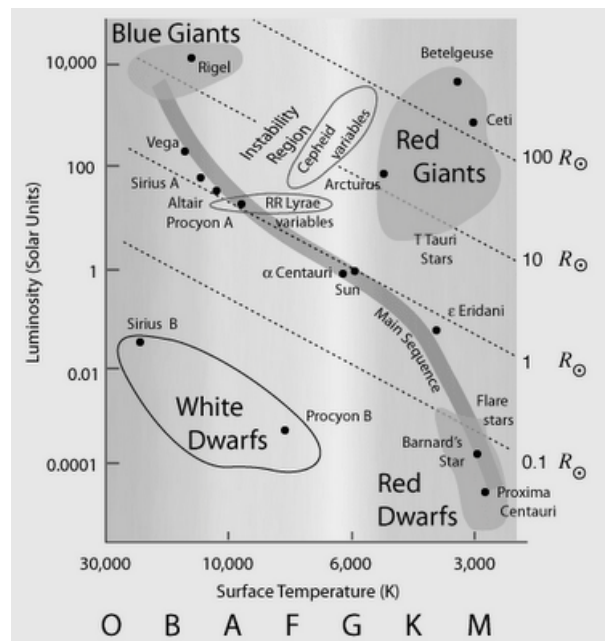
Estrellas variables

Se entiende como estrella variable aquella cuya luminosidad varía a lo largo del tiempo. A pesar de que todas las estrellas son variables, su luminosidad varía a lo largo de su evolución, nos centraremos en aquellas en las cuales los cambios se producen con una mayor rapidez

(duración no comparable a la de su vida)

Si miramos el diagrama de *Hertzsprung - Russell (HR)* las estrellas variables se encuentran en una banda de inestabilidad en la parte superior como podemos ver en el gráfico adjunto.

Antes de sumergirnos en las estrellas del tipo RR Lyrae veamos los distintos tipos de variables.



Las estrellas variables se pueden dividir en dos grupos, extrínsecas e intrínsecas. Las primeras son aquellas en las que la variación de luminosidad no depende de cambios físicos en las propias estrellas (como en las segundas), sino de factores externos, como rotación o eclipses entre distintas componentes (en caso de tratarse de un sistema binario).

Variables extrínsecas

- β Persei: Son estrellas variables de tipo EA, binarias eclipsantes con sus dos componentes prácticamente esféricas. El mínimo secundario es poco profundo o inexistente.
- β Lyrae: Son estrellas variables de tipo EB, sistemas binarios cuyas componentes son elípticas. Por tanto, en sus curvas de luz es imposible afirmar con precisión el momento de inicio y final de un tránsito. Se tratan de estrellas de tipo espectral B o A.
- W Ursae Majoris: Son estrellas variables de tipo EW, sistemas binarios de contacto en el que una (o las dos) componentes ha llenado su lóbulo de Roche por lo que se produce una transferencia de materia. La profundidad del mínimo primario y secundario son prácticamente iguales.

Variables extrínsecas

Existen dos tipos principales: las pulsantes y las eruptivas. En este tipo de estrellas los cambios de brillo provienen de cambios físicos en la propia estrella y no de eclipses entre sus componentes, como es el caso de las extrínsecas.

Pulsantes

- Cefeidas: Prototipo δ Cephei. Estrella variable fundamental en la astronomía debido a su regularidad en la relación periodo-magnitud. Se trata de estrellas supergigantes de población I y de tipo espectral F-K. Se encuentran fundamentalmente en el disco de la galaxia. Su periodo varía entre 1 y 50 días y su luminosidad entre 0.3 y 2.5 magnitudes.

- Mira: Prototipo *Omicron Ceti*. Estrella supergigante de tipo M. Se las denomina variables de largo periodo puesto que suelen estar comprendidos entre 100 y más de 50 días. La variación es de 6 magnitudes en el visible.
- RR Lyrae: Estrella de población II de gran importancia en la astrofísica para el cálculo de distancias debido a su regularidad. Se suelen encontrar en el halo galáctico y más comúnmente en los cúmulos globulares. Pueden presentar una variación del pulso de luz que más adelante estudiaremos.
- W Virginis: Se tratan de estrellas de población II, pero con un comportamiento bastante similar a las Cefeidas. Son estrellas menos masivas que las cefeidas y de tipo espectral F-K.
- Irregulares: Supergigantes muy masivas y jóvenes. Normalmente los cambios de luminosidad se deben a procesos convectivos en la superficie de éstas.

Eruptivas

- Nova: Se clasifican en tres tipos, *ordinarias*, *recurrentes* y *enanas*. El incremento de brillo se produce a lo largo de uno o dos días hasta llegar al máximo que puede oscilar entre 7 y 16 magnitudes. Tanto las novas recurrentes como las enanas tienen estallidos periódicos, que en el caso de las enanas, se pueden espaciar más de 600 días, mientras que en las ordinarias los estallidos solo se producen una vez o están tan espaciados que es imposible haber hecho alguna medición del anterior. Tanto en unas como en otras la variación de brillo es proporcional al logaritmo del tiempo transcurrido entre estallidos. Las novas se tratan de sistemas binarios en el que una de las estrellas llena su lóbulo de Roche y transfiere material a su compañera, hasta que esta se vuelve inestable y expulsa las capas externas en una explosión de hidrógeno.

- **R Coronae Borealis:** Al contrario que las novae la estrella pasa de una forma súbita de estado normal a 10 magnitudes menor. Esto se produce ya que la estrella es muy rica en polvo, que produce una especie de cascarón a su alrededor y oculta la estrella de forma temporal hasta que se deshace de él.
- **Supernovas:** Son las estrellas que tienen una mayor variación en su magnitud llegando hasta un incremento de 20 magnitudes. Se clasifican en dos tipos I y II, las primeras a su vez se dividen en Ia y Ib. Las supernovas de tipo I se producen en sistemas binarios en el que una de las componentes supera el límite de Chandrasekhar; las de tipo II son debidas a estrellas supermasivas muy jóvenes.
- **T Tauri:** Estrellas recién formadas rodeadas de nubes de gas y polvo. Las variaciones en su brillo son irregulares.
- **UV Ceti:** Estrellas de tipo M jóvenes. Las variaciones de brillo se producen por *flares* en su superficie debido a su campo magnético. Suele aumentar entre 4 y 5 magnitudes su brillo para luego decaer a lo largo de varios minutos.

RR Lyrae

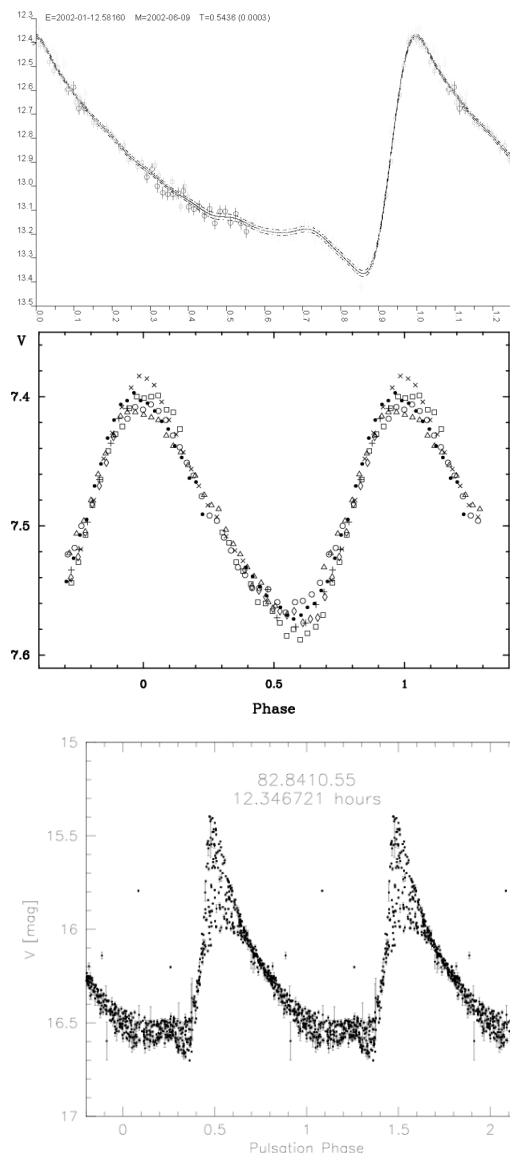
Las estrellas RR Lyrae juegan un importante papel en la astrofísica como candelas estándar para la determinación de distancias y como un buen indicador para estudiar la evolución del universo en edades tempranas.

Como ya hemos visto antes, estas estrellas ocupan un lugar muy destacado entre las variables pulsantes. Su gran amplitud en la variación de brillos es bien conocida desde el siglo XIX. A pesar de haber sido muy bien estudiadas estas estrellas, aún deparan bastantes secretos, como el origen del denominado efecto Blazhko, una modulación periódica en amplitud y fase en las pulsaciones de la estrella con periodos típicos entre unas pocas horas y varios días.

Dependiendo del tipo de modulación en la amplitud las estrellas RR Lyrae se dividen en tres subclases:

- **RRab** son aquellas que pulsan en el modo fundamental.
- **RRc** pulsan en el primer armónico.
- **RRd** combinación de ambas.

Este efecto de modulación del pulso, efecto Blazhko, se ha venido estudiando de una manera sistemática en diversos cúmulos globulares del hemisferio norte por Kovacs (1995), Smith et al. (2003) Preston et al. (1965), por mencionar los más relevantes. Estas observaciones sistemáticas, tras numerosos análisis de Fourier, han confirmado sin duda alguna los tres modos fundamentales antes descritos.



Modulación RRab, RRc y RRd

Modelos de pulsación

El espectro de frecuencias de luz y las curvas de velocidad radial de las estrellas RR Lyrae presentan una doble o triple estructura alrededor del pulso principal y sus armónicos con una pequeña separación correspondiente a la frecuencia del efecto Blazhko. (Moskalik & Poretti, 2003)

Buena parte de las estrellas que presentan este efecto tienen un gran amortiguamiento en el máximo de intensidad correspondiente al modo de pulsación fundamental. Las observaciones confirman que existe una transición continua entre las variables que producen las distintas modulaciones, por lo que debe existir una estrecha relación entre ellas.

La velocidad en la variación del pulso (efecto Blazhko) es demasiado alta para que pueda proceder de una evolución ordinaria en la estrella, por lo tanto debe provenir de otras causas.

Las hipótesis que siempre se han manejado para la explicación de este fenómeno están centradas en dos modelos, el de resonancia y el magnético.

Modelo de resonancia

Está basado en una resonancia no lineal entre el modo fundamental radial y el no radial. En este modelo el dipolo $l=1$ tiene las más altas probabilidades para estar excitado no linealmente (Nowakowski & Dziembowski, 2001)

El periodo de modulación está determinado por el ritmo de variación del dipolo y su frecuencia está directamente relacionada con la modulación por la zona radiativa más interna de la estrella.

Este modelo, aunque tiene una gran correlación con algunas estrellas que presentan el efecto Blazhko, no podemos considerarlo como un modelo válido ya que muchas otras se desvían demasiado.

Modelo magnético

Está basado en un pulsador oblicuo simple en el que se supone que las estrellas Blazhko tienen el campo magnético inclinado respecto a su eje de rotación. El modo radial fundamental está deformado debido al campo magnético

que produce una componente cuadrupolar adicional ($l=2$) cuyo eje de simetría coincide con el del eje magnético.

Debido a la rotación de la estrella, desde nuestro punto de vista las componentes del pulso varían causando la modulación en la amplitud que se observa en las estrellas tipo roAP.

Dependiendo de qué componente se observe, el periodo del efecto Blazhko puede ser igual al periodo de rotación o la mitad de este.

En ambos modelos las amplitudes deben ser constantes ya que la modulación de la curva de luz observada es una consecuencia directa de la rotación de la propia estrella. Por lo tanto, la profundidad de esta modulación depende directamente del grado de inclinación del eje de la estrella respecto al observador.

A todo esto debemos añadir que los fenómenos de convección, hidrodinámica no lineal, resonancias entre el modo fundamental y el primer armónico pueden favorecer la aparición del efecto Blazhko pero no ser su causa directa.

También podemos encontrar una nueva solución para este efecto descrito por Detre & Szeidl en 1973 como una oscilación en el campo magnético similar al que se produce en distintos periodos de actividad, tal y como ocurre en el Sol.

Todos estos modelos, y alguno más que no aparece aquí descrito, proponen una solución al extraño fenómeno de pulsación, pero solamente el *Obliquely Oscillating Magnetic Rotator* (Kurtz, 1982) explica de una forma satisfactoria la variación en el brillo de estas estrellas. Más adelante nos referiremos a este modelo como *modelo de pulsador oblicuo*.

Observaciones

Hasta hace relativamente poco tiempo era imposible discernir entre las distintas propuestas debido a la imprecisión de las medidas y su escasa continuidad. Pero gracias a proyectos de observación como MACHO ¹ y OGLE ² estas observaciones son mucho más completas y nos permiten hacer un estudio más en profundidad

¹Massive Compact Halo Object

²Optical Gravitational Lensing Experiment

y, así filtrar los distintos modelos para dar con el correcto.

Por tanto, como podemos ver era necesario una campaña de observación cuanto más larga mejor, ya que los periodos de oscilación del brillo de una estrella están en el rango de horas y, el del efecto Blazhko del orden de varios meses. Desde tierra es evidente que es imposible hacer una observación sistemática con un único instrumento (para evitar errores entre las sensibilidades de los distintos instrumentos empleados) había que esperar a tener observatorios espaciales suficientemente sensibles como CoRoT³, como veremos más adelante.

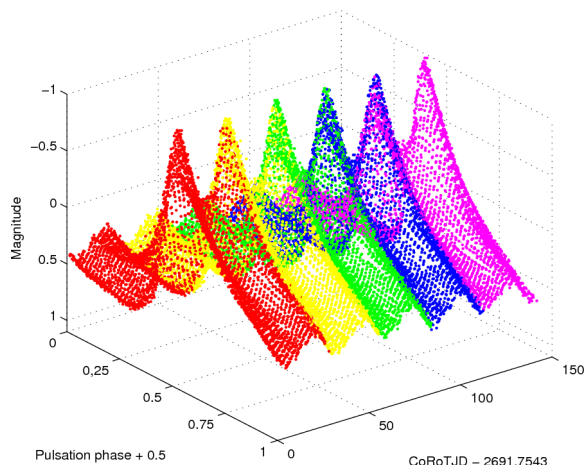
La finalidad del proyecto MACHO es, mediante la fotometría de alta resolución de estrellas de la Gran Nube de Magallanes -en adelante *LMC*- encontrar objetos de gran masa, que se encuentran en el halo de nuestra galaxia, por la variación de brillo que produce en las estrellas de la *LMC*, efecto de microlente gravitacional.

Por otra parte, CoRoT es un observatorio espacial orientado a la búsqueda de exoplanetas, que aunque con una menor sensibilidad que MACHO, nos permite observaciones continuas de un mismo objeto, lo que redundará en un mayor conocimiento de las características del efecto Blazhko de las estrellas de nuestro estudio.

Análisis

Siguiendo con el satélite CoRoT, en la observación realizada en las estrellas 0100689962, 0101128793, 0101370131, 0100881648 y 0101503544 durante un periodo de 152 días manifiesta una clara pulsación de 0.5 magnitudes, como podemos ver en la imagen adjunta.

Las curvas de luz se han depurado mediante transformaciones de Fourier en las que se han conservado solamente los valores significativos. Este análisis presenta por primera vez, para varias estrellas de nuestra galaxia, distintos comportamientos para un mismo periodo de tiempo.



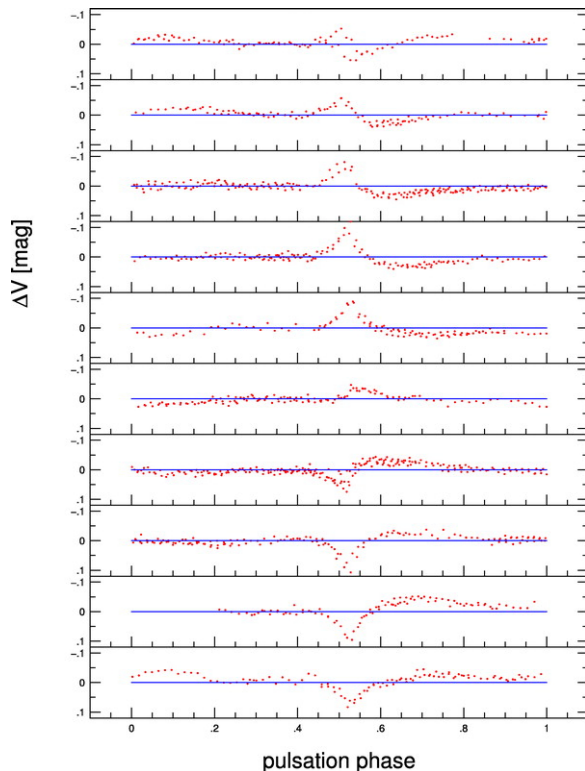
Seguimiento de brillo de 0100689962. Fuente: CoRoT Team 2009

Particularizando para 0100689962, en el periodo de 150 días de observación se han producido 6 ciclos del efecto Blazhko que revelan un claro modo de pulsación dominante con una frecuencia $f_1 = 2,809 \text{ c/d} = 0,36 \text{ d}$ y un periodo modulador con frecuencia $B = 0,0382 \text{ c/d} = 26,18 \text{ d}$. Este modo de pulsación presenta una fuerte no linealidad que se puede extraer del análisis hasta armónicos de orden 17. También se han detectado combinaciones lineales con el periodo fundamental que corresponde a armónicos y a la modulación Blazhko. Estos resultados apoyan fuertemente la hipótesis del pulsador oblicuo.

Para ratificar aun más esta hipótesis, la observación de la estrella SS Cancri, por tratarse de la estrella de tipo RRab con el periodo más corto conocido, apenas 5.309 días, es un buen ejemplo de lo rápida que puede ser esta modulación. En el análisis de Fourier de la curva de luz en la banda V se han encontrado armónicos de un orden muy superior al de 0100689962 llegando al 24 en este caso.

En el siguiente gráfico podemos ver las distintas fases de la evolución típica del efecto Blazhko en una estrella RR Lyrae, en nuestro caso SS Cancri.

³Convection Rotation and planetary Transits



Distintas fases del efecto Blazhko en SS Cancri. Fuente: The shortest modulation period blazhko RR Lyrae star: SS Cancri. Jurcsik, J. et al.

Como muy bien se concluye en el estudio de Jurcsik, hay ciertas discrepancias entre el modelo teórico y las observaciones experimentales que no pueden describir las fuertes asimetrías existentes en los órdenes más bajos de la modulación.

Por tanto, ambas observaciones confirman la validez del pulsador armónico, si bien no es del todo correcto ya que aunque explica sin problemas la aparición del efecto Blazhko en estrellas de largo periodo, tiene ciertas dificultades para las de periodo tan corto como SS Cancri o RR Geminorum, ya que en estas estrellas la modulación es demasiado rápida como para achacar ciertas irregularidades a combinaciones lineales. En consecuencia, hay que refinar aun más el modelo para explicar a la perfección la dinámica de estas estrellas puesto que aproximadamente el 30% de todas las RR Lyrae de la galaxia que pulsan en el modo fundamental (RRab) presentan este efecto modulador.

Población

Uno de los métodos más utilizados en astrofísica para la determinación de distancias en el Grupo Local de galaxias es la correlación entre la magnitud visual y la metalicidad $M_V \propto [Fe/H]$. Este método en principio es muy robusto pero presenta serias deficiencias, por ejemplo: fuerte dependencia de la evolución estelar, posible no linealidad en la metalicidad y la no existencia de una corrección bolométrica tabulada.

Fotometría

Ferraro y Del Príncipe estudiaron las poblaciones de RR Lyrae en M3, M13 y M92, todos cúmulos globulares que se encuentran en el halo de nuestra galaxia. Tanto M3 como M13 son idénticos en composición química, en cambio, M92 es un cúmulo globular de baja metalicidad. Por tanto, son buenos candidatos para el estudio de la dependencia de edad, metalicidad y entorno en el desarrollo del efecto Blazhko en estrellas RR Lyrae. También Smolec estudió este tipo de estrellas en la LMC. De esta forma podemos ampliar aun más el estudio y no restringirnos a la Vía Láctea.

Cuando hacemos la fotometría en la banda K, al compararla con las B y V, presenta una menor incertidumbre en la corrección bolométrica y una menor dependencia de la metalicidad. En el caso particular de M3 podemos comprobar como las estrellas RR Lyrae cumplen la relación Periodo - Luminosidad para la banda K. Por tanto, para mejorar el estudio debemos extender las observaciones al infrarrojo cercano para obtener unas incertidumbres menores. Cuando se estima la distancia a M92 mediante observaciones en la banda K el error obtenido es menor al 5% respecto a otros métodos basados en indicadores de distancia, como se puede ver en la tabla siguiente:

PL_J	PL_H	PL_K	FOBE
14.61 ± 0.06^a	14.60 ± 0.07^a	14.61 ± 0.05^a	14.62 ± 0.07^c
14.63 ± 0.05^b	14.61 ± 0.06^b	14.62 ± 0.04^b	...

MS fitting	ZAHB	BW	RGB Tip
14.61 ± 0.05^d	14.62 ± 0.10^f	14.47 ± 0.15^e	14.56 ± 0.20^i
14.64 ± 0.07^e	...	14.60 ± 0.26^h	...

Determinación de distancias de M92. Fuente: Del Principe et al. 2005

En el diagrama siguiente podemos ver cómo la siempre presente brecha correspondiente a las RR Lyrae es muy poco sensible al color U-V en relación a la temperatura efectiva de la estrella. Además, está comprimida horizontalmente en el caso de M3 debido a la falta de estrellas de tipo (*BL Herculis*)

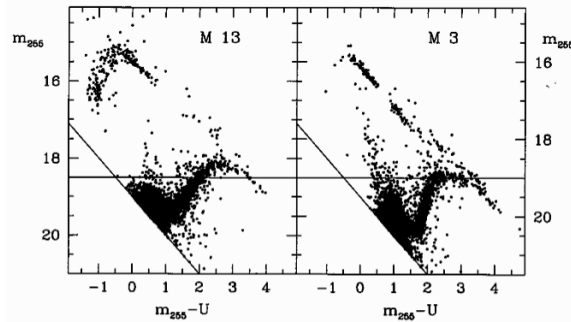


Diagrama de distribución estelar en el que se observa la traza horizontal de la RR Lyrae para M13 y M3. Fuente: HST

En el caso de M3 y M13, ¿puede ser responsable las distintas edades de los cúmulos causantes de la diferencia en la distribución de las estrellas de la traza horizontal? Según los últimos modelos informáticos la edad requerida es de aproximadamente 5 Gyr, en cambio, la banda de las RR Lyrae cambia en un período de menos de 2 Gyr, por lo que es imposible que la edad sea algo relevante en su aparición en cúmulos.

Metalicidad

Como ya hemos apuntado antes los proyectos MACHO y OGLE nos han permitido ampliar el número de estrellas RR Lyrae conocidas en el bulbo de nuestra galaxia y en la LMC. En un principio las observaciones indican una mayor incidencia del efecto Blazhko en el bulbo de la Vía Láctea debido a su mayor metalicidad. Pero, como veremos, este efecto parece preferir una metalicidad ligeramente menor en la LMC que en el Bulbo Galáctico.

En 1995 Kovács y Zsoldos propusieron un nuevo método para la estimación de la metalicidad en las RRab basado en el análisis de

Fourier del brillo de éstas. Además de una explicación de la dinámica del modo de pulsación de la estrella, podemos extraer de este análisis de Fourier la relación entre $[Fe/H]$

Para estimar la abundancia de las estrellas variables con efecto Blazhko, es necesario extraer del análisis de Fourier algunos parámetros fundamentales mediante el ajuste de la curva de luz por series de Fourier hasta conseguir una perfecta correlación de su frecuencia mediante armónicos. Estos ajustes podemos aplicarlos de una forma directa a las estrellas de nuestra galaxia, pudiendo distinguir entre los distintos modos de pulsación. Sin embargo, en la LMC es más complicado y dichos modos se observan idénticos.

Cuando comparamos los análisis de las estrellas que no presentan la modulación y las que sí, podemos observar como las de efecto Blazhko prefieren un valor menor en sus amplitudes.

Si refinamos este análisis de Fourier hasta tener tres parámetros libres encontramos que la relación $[Fe/H]$ es un buen estimador en nuestra galaxia. En cambio, con la LMC es mejor utilizar dos parámetros libres en el ajuste debido a diferencias en las propiedades de las estrellas tanto de una como de otra galaxia.

Gracias a este estudio podemos concluir que la incidencia del efecto Blazhko es independiente de la metalicidad de las estrellas en la Vía Láctea y equivale a un 30 % del rango de metalicidad total (-1.4, -0.8) En la LMC, prefiere una metalicidad algo menor, $[Fe/H] < -1,4$ y el ratio de presencia de estas estrellas es del orden del 20 %. Por tanto, la mayor incidencia en la Vía Láctea es comparable a la de la LMC y no puede atribuirse a la diferencia de metalicidades.

Es necesario un estudio más completo para averiguar por qué aparece este efecto modulador en las estrellas, ya que como hemos visto es independiente de la edad, procesos físicos y metalicidad, pudiendo ser tan solo efectos de rotación del sistema.

Referencias

- [1] Hubble space telescope ultraviolet observations of the cores of M3 and M13, *Ferraro, F. R., et al. 1997, A&A⁴, 484, 145*
- [2] Photometry of variables in globular clusters, M13, *Demers, S. 1971, AJ⁵, 76, 5*
- [3] Near-Infrared observations of RR Lyrae variables in galactic globular clusters, the case of M92, *Del Principe, M., et al. 2005, preprint*
- [4] The Blazhko Effect in RR Lyrae stars: Strong observational support for the oblique pulsator model in three stars, *MACHO Project Science, 1998, AJ, preprint*
- [5] Estrellas variables en M3 *Genebriera, J., sin publicar*
- [6] The shortest modulation period blazhko RR Lyrae star: SS Cancri *Juresik, J., Szeidl, B., Sódor, Á. et al. 2006, AJ, 132, 61*
- [7] Metallicity dependence of the Blazhko effect *Smolec, R., 2005, Acta A.⁶ 55, 59*
- [8] First RR Lyrae light curves from CoRoT Multiperiodicity and Blazhko phenomenon *Chadid, M., Kolenberg, K., Paparo, M., Poretti, E. & RR Lyrae CoRoT Team 2009, CoRoT, póster*

⁴Astronomy & Astrophysics

⁵Astronomical Journal

⁶Acta Astronomica