

Trabajo de fin de máster

Máster en Astrofísica

Seguimiento de las trayectorias de los objetos de masa planetaria más fríos y cercanos

Juan Villafañe Calvo

Tutor: Eduardo Martín Guerrero de Escalante



Universidad
de La Laguna

Índice

1. Abstract	2
2. Introducción teórica	3
2.1 Enanas Y	3
2.2 Lente gravitacional	5
3. Objetivos.....	6
4. Selección de muestra.....	7
5. Metodología	9
6. Resultados y discusión	10
6.1 Trayectorias de las enanas.....	10
6.2 Fenómenos de microlente gravitacional.....	26
7. Conclusiones	29
8. Bibliografía.....	29
9. Lista de tablas y figuras.....	31
9.1 Lista de tablas	31
9.2 Lista de figuras	32
Anexo 1: Script de Python	33

1. Abstract

This master's thesis focuses on the study of trajectories of Y dwarfs. These objects are the coldest and smallest stellar bodies not considered planets. A considerable amount of the properties and characteristics of these Y dwarfs are still unknown. This is caused by the fact that they barely emit visible light and they are also very faint in the infrared. As an example, one of the stars in this work, WISE J0855-0714, is the eighth closest known stellar object to the Sun and it was not known until 2014.

Among all the properties of brown dwarfs and, specifically, Y dwarfs, the most difficult to determine are mass and age. In order to compute their evolutionary phase, very precise evolutionary models of these objects exist, but all of them require the knowledge of at least the mass of the body or its. Knowing one of them with precision would determine the accurate knowledge of the other.

Considering the study of the trajectories of these Y dwarfs, the main goal is the discovery of a conjunction, or an approach, between these bodies and the background stars in their fields. These conjunctions, if they happen close enough, can provoke a gravitational lens phenomenon. Said phenomenon consists on the deviation of the light coming from a faraway source when it travels near a massive object, which in this case is the Y dwarf. Due to the the very small size of the Y dwarfs compared to the objects that usually cause a gravitational lens, this phenomenon is usually called microlens.

The mass of the object can be calculated by studying the consequences of the microlens in the background star: the rise of its photometric flux or the astrometric shift of the star in the sky.

Nowadays, 29 known Y dwarfs are known and 17 of them have been selected for this work. The study could have been done with all of them, but the time it would have taken is beyond the constraints of this master's thesis. The selection criteria has been based on temperature and distance. Those chosen are the coldest and closest to the Sun.

The temperature restriction has been chosen because the coldest Y dwarfs are the most interesting in relation to the existence of life. This existence of life is independent to the microlens phenomenon, but these cold Y dwarfs will probably be studied in depth in future years, since they meet the temperature requirement for life as known on Earth. This work could lead to results which would be useful data for the analysis of these objects.

The distance restriction has been chosen because the closest Y dwarfs are more likely to have greater proper motion. This increases the probability of a conjunction between the Y dwarfs and the background stars in their fields. It is obvious that the bodies with higher proper motion and the ones with more populated fields have higher probability of conjunctions.

The complete trajectory of each Y dwarf has been computed, including its error, by means of a Python script that incorporates all the motion parameters. These are the position on a specific day, the proper motion and the parallax motion. Each trajectory has been overlaid on top of images of the field for each body in the sample. In order to cover the whole sky, these images have been selected from Pan-STARRS and the SkyMapper Southern Survey. The time span for this study is 30 years, from 2009 to 2039.

12 conjunctions where the Y dwarf passes within 5 arcseconds of the background star have been detected analysing the images with the Gaia catalogue and by eye. These are expected to lead to microlens phenomena. Among them, three are supposed to have already happened, while nine of them are still yet to occur. The date of maximum approach and the minimum separation between the background star and the Y dwarf has been calculated for all of them. The magnitude of the background star has been acquired from the Gaia catalogue.

Moreover, reviewing the literature, the limits of mass and distance to the Sun of each Y dwarf has been obtained. Using these parameters, an Einstein ring radius has been calculated for each dwarf and the values obtained range between 1.5 and 5.5 milliarcseconds. The photometric amplification and astrometric displacement on each phenomenon has been determined combining those Einstein ring radii with the characteristics of the conjunctions. In these calculations, a maximum and a minimum have been obtained, taking into account the error on the data of the literature.

The microlens causes a photometric amplification of the background stars, where they increase between 10^{-6} and 10^{-11} percent of its original flux. Regarding the photometric shift, the background stars change their position in the sky between 1 microarcsecond and 50 microarcseconds.

This means that the photometric amplification is very faint to be observed with the instrumentation used at the moment. However, the photometric shift is closer to the astrometric precision of the best telescopes nowadays. With the launch of the WFIRST telescope in 2025, this phenomenon is expected to be measured, since the photometric displacement of the background star is similar to the expected precision of the telescope for the worst case scenario in this work.

Only in one of the three conjunctions that have already occurred, the background star was included in the Gaia catalogue and the displacement was big enough. The Gaia database could have been searched attempting to obtain a hint of this phenomenon. However, the precision of Gaia is not high enough in order to detect this displacement. Furthermore, the treatment of this data needs a Bayesian analysis that would be out of the scope of this work.

For the nine future conjunctions, the observation of these gravitational microlenses would give more precise data about the mass of the Y dwarf under study. If the values of the astrometric shifts are measured, the mass of this brown dwarfs could be calculated with an unseen precision until this moment by reverse engineering this work. As indicated before, this would give information about the evolutionary states of this Y dwarfs, its age, and it would help comprehend the least known spectral type to date.

2. Introducción teórica

2.1 Enanas Y

Las estrellas que observamos en el cielo se clasifican en función de su tipo espectral. Este tipo espectral está relacionado con la temperatura de la propia estrella, siendo las de tipo O las más calientes, pasando por los tipos B, A, F, G, K y M, siendo las estrellas de este último tipo las más frías^[1].

Dentro de este último tipo espectral, existen objetos que no tienen masa suficiente para la fusión termonuclear del hidrógeno y que no son denominados estrellas, sino enanas marrones o cuerpos subestelares. Este límite de masa se encuentra entre 70 y 90 masas de Júpiter, dependiendo de su metalicidad ^[2]. Estos objetos subestelares cuentan con más tipos espectrales, como son el L, T e Y, en orden de temperatura.

En este trabajo se van estudiar las enanas marrones de tipo Y. Estas enanas son las más frías y las menos masivas y se encuentran muy cerca del límite para ser consideradas planetas. Se han propuesto varios límites para esta diferenciación, por ejemplo, la posibilidad de fusionar deuterio (13 masas de Júpiter) ^[3]; pero la gran incertidumbre que existe en torno a su edad, masa y mecanismo de formación provoca que esta distinción sea compleja.

Las enanas Y tienen muy poca emisión en el visible, de modo que, para analizarlas, es necesario utilizar la zona infrarroja del espectro. Estos objetos se definen por tener un espectro con varios picos característicos en el infrarrojo cercano, en las bandas Y, J y H. Estos picos nos dan una gran cantidad de información acerca de la enana. Se forman por la presencia de elementos como agua o metano, cuya absorción ocurre en las zonas del espectro que se encuentran entre ellos. Esto se ve en la figura 1:

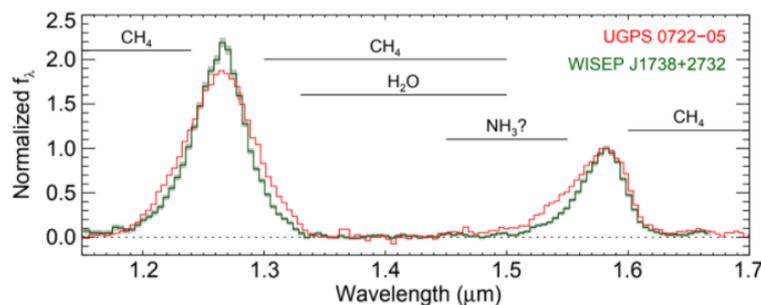


Figura 1: Espectro de una enana de tipo T tardío (T9, en rojo) con el estándar de las Y0 (en verde) ^[4].

En la figura 1 aparece el espectro de una enana Y0 (en verde) y de una enana T9 (en rojo) comparadas en la zona del infrarrojo cercano entre 1.15 y 1.7 micras, es decir, se muestran los picos de las bandas J y H. La principal diferencia que existe entre enanas T e Y es que estas últimas muestran picos más estrechos ^[4]. El hecho de que el pico en J sea más estrecho se debe a la mayor abundancia de metano, mientras que el pico en H se ha propuesto que se hace más estrecho debido a la absorción por cantidades importantes de amoníaco en la atmósfera del objeto ^[5].

Las características físicas de las enanas Y son las siguientes:

- Masa: aproximadamente entre 1 y 70 masas de Júpiter. El límite inferior viene dado porque es la masa mínima teorizada para la formación de un objeto por colapso ^[3], mientras que el superior viene dado por medidas de masas dinámicas en binarias, como Gliese 229B, de tipo espectral T6.5 ^[6]. Los modelos de evolución de enanas Y suelen dar masas máximas más bajas, en torno a 20 masas de Júpiter.
- Temperatura: Menor de 500 K. La más fría estudiada tiene una temperatura entre 240 y 260 K ^[7].

Sin embargo, mientras que la estimación de temperaturas es relativamente sencilla, precisa y exacta mediante modelos, la estimación de la masa de las enanas es complicada, poco precisa y depende mucho del momento evolutivo del objeto. Por

tanto, la mayoría de las enanas Y tienen un rango de masas posibles muy amplio, como se observará en la tabla 2. El único caso en el que la masa de una enana Y está restringida razonablemente es en el que la enana Y tiene una compañera.

Además, cabe destacar que la masa de una enana Y está relacionada con su edad. De este modo, conocer con suficiente exactitud una de ellas, permite obtener la otra con mucha precisión mediante los modelos ya existentes ^[2].

El tipo espectral Y es un tipo propuesto hace poco tiempo y que no se ha estudiado en tanta profundidad como otros tipos espectrales, dado que apenas emiten en la zona visible del espectro. Así pues, la gran mayoría de características de estos cuerpos subestelares están aún por descubrir y definir.

2.2 Lente gravitacional

En la teoría de la relatividad general de Einstein se propuso que los rayos de luz se desvían al pasar cerca de un objeto muy masivo ^[8], teoría que se probó en 1919 ^[9]. Si dos objetos, uno más lejano que el otro, se encuentran alineados con la Tierra, se forma un anillo de Einstein sobre el más cercano. Este se define como la imagen con forma circular de un objeto lejano, formada alrededor de un cuerpo masivo situado en la línea de visión entre el primero y la Tierra. Este fenómeno ha sido observado para el caso de galaxias o cúmulos de galaxias que se encuentran detrás de otros objetos masivos, como estrellas u otras galaxias ^[10].

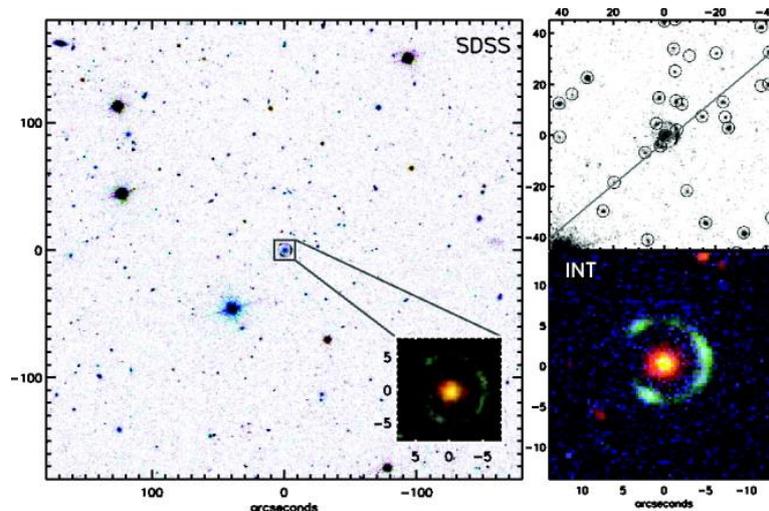


Figura 2: Anillo de Einstein alrededor de una galaxia roja ^[10].

Para el caso de enanas marrones que pasan por delante de otros objetos, normalmente estrellas, esta desviación de la luz es menor que la que se produce con otros cuerpos más masivos, pero sigue siendo apreciable. Este fenómeno se conoce como microlente gravitacional.

Cada objeto estelar tiene su radio del anillo de Einstein, cuyo tamaño se calcula con la siguiente fórmula ^[11]:

$$\theta_E = \sqrt{\frac{4 \cdot G \cdot M_L}{d_\pi \cdot c^2}} \quad (1)$$

Donde θ_E es el radio de Einstein, G es la constante de gravitación universal, M_L es la masa del objeto que hace de lente, d_π es la distancia paraláctica y c es la velocidad de la luz.

La distancia paraláctica se calcula de la siguiente manera ^[11]:

$$\frac{1}{d_\pi} = \frac{1}{D_L} - \frac{1}{D_S} \quad (2)$$

Donde D_L es la distancia a la lente y D_S la distancia a la fuente de luz. Para el caso en el que nos encontramos, con unas lentes muy cercanas a nosotros y unas fuentes muy lejanas, la distancia a la fuente se considerará infinita.

También existen aproximaciones para facilitar el cálculo del radio de Einstein partiendo exclusivamente de la masa del objeto y su distancia a nosotros ^[12]:

$$\theta_E = 3 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{M_L}{D_L}} \quad (3)$$

Con la masa de la lente en masas solares y la distancia a la lente en kilopársecs.

Para un evento de lente gravitacional podemos dar un parámetro adimensional u , que es similar al parámetro de impacto en interacciones electromagnéticas. Tiene la siguiente fórmula ^[11]:

$$u = \frac{\Delta\theta}{\theta_E} \quad (4)$$

Aquí $\Delta\theta$ da cuenta de la distancia de máximo acercamiento en el cielo entre la lente y la fuente. El parámetro u da cuenta de la intensidad del fenómeno de microlente.

A partir de este parámetro se puede calcular la amplificación fotométrica ^[11]:

$$A = \frac{u^2 + 2}{u \cdot \sqrt{u^2 + 4}} \quad (5)$$

Y también se puede calcular la desviación astrométrica de la centroide de la fuente, que viene dada por la siguiente ecuación ^[11]:

$$\partial\theta = \frac{\theta_E}{u} = \frac{\theta_E^2}{\Delta\theta} \quad (6)$$

Estos dos cálculos son las dos medidas que se toman en un fenómeno de lente gravitacional.

3. Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es el análisis de las trayectorias de las enanas Y más frías y cercanas al Sol.

Mediante el análisis de estas trayectorias se pretende descubrir alineaciones o conjunciones de las enanas Y con estrellas u otras fuentes de luz. Estas conjunciones provocarían fenómenos de lente gravitacional que permitirían obtener medidas muy

precisas de la masa de la enana Y. La masa de estas enanas no se ha podido medir con precisión hasta el momento, por lo tanto, sería un gran avance en este campo. Determinando su masa, se puede saber con bastante exactitud la edad de las enanas Y utilizando modelos evolutivos.

4. Selección de muestra

De las 29 enanas Y conocidas, se han seleccionado 17 para este trabajo. Podrían haberse estudiado todas ellas, pero por limitaciones de tiempo, se ha decidido restringir la muestra. Se han elegido las de menor temperatura efectiva y las que se encuentran en la vecindad solar.

El criterio de selección para la distancia se debe a que los objetos más cercanos al Sistema Solar tienen mayor probabilidad de tener un movimiento propio elevado ^[11]. Esto, y que los campos de estas enanas estén muy poblados, hace que sea más probable que existan conjunciones entre estas y las estrellas de fondo.

El criterio de temperatura no está relacionado con el fenómeno de microlente, sino que se debe a que las enanas Y más frías muy probablemente sean objeto de estudio en un futuro próximo. Esto se debe al interés que pueden suscitar para albergar vida. Parece que las condiciones de temperatura necesarias para la vida tal y como la conocemos en la Tierra se dan en la atmósfera de estas enanas Y frías ^[13]. Este trabajo podría tener resultados útiles para el futuro análisis de estos cuerpos. Las enanas Y seleccionadas vienen dadas, junto a sus coordenadas, en la tabla 1:

Tabla 1: Enanas Y analizadas en este trabajo.

Nombre	Nombre abreviado	Ascensión recta (Coordenadas horarias)	Declinación (Grados sexagesimales)
WISE J0146+4234B	0146	01:46:56.66	+42:34:10.0
WISE J0350-5658	0350	03:50:00.32	-56:58:30.2
WISE J0535-7500	0535	05:35:16.80	-75:00:24.9
WISE J0647-6232	0647	06:47:23.23	-62:32:35.5
L97-3B (LTT 3059)	0807	08:07:14.67	-66:18:48.7
WISE J0825+2805	0825	08:25:07.33	+28:05:47.6
WISE J0830+2837	0830	08:30:11.95	+28:37:16.0
WISE J0855-0714	0855	08:55:10.74	-07:14:42.5
WISE J1405+5534	1405	14:05:18.40	+55:34:21.5
CWISE J1446-2317	1446	14:46:06.62	-23:17:17.8
WISE J1541-2250	1541	15:41:51.65	-22:50:25.2
WISE J1639-6847	1639	16:39:40.84	-68:47:39.4
WISE J1738+2732	1738	17:38:35.58	+27:32:58.3
WISE J1828+2650	1828	18:28:31.08	+26:50:37.8
CWISE J1935-1546	1935	19:35:18.59	-15:46:20.3
WISE J2209+2711	2209	22:09:05.75	+27:11:43.6
WISE J2354+0240	2354	23:54:02.79	+02:40:14.1

Las posiciones de cada una de las enanas Y en la tabla 1 vienen determinadas por la que se dio en el artículo de su descubrimiento. Para el cálculo de las trayectorias se ha elegido la posición de todas el mismo día (01/01/2014) ^[14], excepto para 0830 ^[15], 1446 ^[16] y 1935 ^[17], descubiertas posteriormente, en las cuales se ha tomado la fecha de su descubrimiento.

De la muestra de 17 enanas, 12 de ellas se encuentran a una declinación mayor de 30° Sur, por lo tanto, aparecen en el catálogo de Pan-STARRS. El resto se encuentran en el SkyMapper Southern Survey.

Para el cálculo del radio de Einstein de cada una de las enanas Y, se ha obtenido su rango de masa y distancia de la bibliografía. Estos datos vienen representados en la tabla 2 ^{[7] [15] [16] [17] [18]}.

Tabla 2: Tipo espectral y rangos de temperaturas, masas y distancias de cada enana Y.

Nombre	Tipo espectral	Rango de temperaturas (K)	Rango de masas (M_{jup})	Rango de distancias (pc)
0146	Y0	400-430	8-20	18.22-19.88
0350	Y1	310-340	3-8	5.64-5.82
0535	$\geq Y1$	360-390	8-20	14.52-15.6
0647	Y1	320-350	5-13	9.73-10.21
0807	Y1	325-350	7-9	18.6-19.8
0825	Y0.5	310-340	3-8	6.32-6.52
0830	$\geq Y1$	300-400	4-13	7-13.1
0855	$> Y2$	240-260	1.5-8	2.25-2.29
1405	Y0.5	370-400	9-21	6.21-6.45
1446	$\geq Y1$	< 380	4-14	8.8-11.8
1541	Y1	360-390	8-20	5.9-6.06
1639	Y0pec	360-390	5-14	4.66-4.78
1738	Y0	410-440	5-14	7.49-7.77
1828	$\geq Y2$	310-340	3-8	9.7-10.17
1935	-	270-360	3-14	5.6-10.9
2209	Y0	310-340	8-19	6.09-6.29
2354	Y1	300-400	3-21	7.74-8.38

El sufijo pec se refiere a las enanas Y cuyo espectro tiene alguna característica peculiar que la diferencia del resto.

CWISE J1935-1546 no tiene un tipo espectral, aún no ha sido clasificada y hay mucha incertidumbre en sus datos.

La mayoría de ellas tiene temperaturas cercanas a las de la Tierra, siendo candidatas a que pueda existir alguna forma de vida similar a las de nuestro planeta ^[13].

Como se predijo en la introducción teórica, se puede ver cómo los rangos de temperatura dados son bastante exactos, al contrario que los rangos de masa, que son muy amplios. Esto provoca poca precisión en los cálculos futuros. El dato de la masa de las enanas es el que se quiere precisar mediante el análisis de las microlentes provocadas por estos cuerpos.

Todas ellas tienen una masa menor a 21 masas de Júpiter y se encuentran a menos de 20 pársecs del Sol.

5. Metodología

Las imágenes para el análisis de las estrellas de fondo se han obtenido de Pan-STARRS^[19], para todas aquellas cuya declinación es mayor a 30° sur; mientras que para el resto se ha utilizado el SkyMapper Southern Survey (en adelante SMSS)^[20], que cubre todo el hemisferio sur.

Mediante un script en Python (incluido en el Anexo 1), se han analizado estas imágenes de los mapeados mencionados anteriormente con el objetivo de superponer en dichas imágenes la trayectoria de las enanas Y junto con su error.

Para representar la trayectoria de cada enana se han tomado los datos de posición, movimiento propio y movimiento de paralaje de la bibliografía, así como el error de cada uno. Esta trayectoria tiene dos componentes: ascensión recta y declinación; y consta de una posición inicial, un vector de movimiento propio y una variación sinusoidal en ambas componentes debida al paralaje.

El movimiento de paralaje se puede representar también por una elipse que da cuenta de la posición de la estrella para cada momento de la oscilación. Esta elipse representa la trayectoria que seguiría la enana en el cielo a lo largo de un año en caso de no tener ningún tipo de movimiento propio. Un ejemplo de elipse de paralaje viene dado en la figura 3:

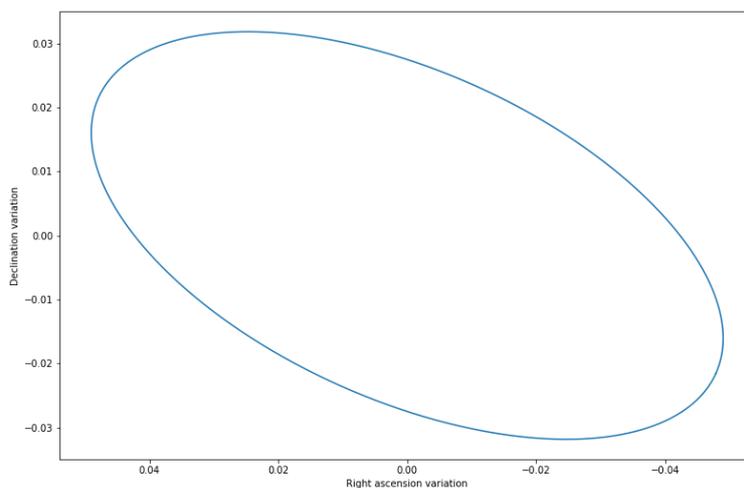


Figura 3: Elipse de paralaje de la enana marrón WISE 0146+4234B.

En el eje x de esta gráfica se representa la variación en ascensión recta y en el eje y se representa la variación en declinación. Los ejes están colocados para una representación de norte arriba y este a la izquierda. Esta elipse se obtiene a partir de tres parámetros: el tamaño del eje mayor, dado por el paralaje; la inclinación respecto del eje x; y la excentricidad, que viene dada por el ángulo β en la bibliografía. De esta elipse se obtiene la diferencia de fase entre la variación de ascensión recta y declinación, es decir, el tiempo que tarda la enana entre los extremos (máximo y mínimo) tanto en ascensión recta como en declinación.

Se han representado datos de la posición de cada enana entre 2009 y 2039. Estos límites se han elegido por la posible observación de desviaciones astrométricas en telescopios espaciales de alta precisión para eventos ocurridos en el pasado. Para el caso de Gaia, lanzado en 2013, el efecto podría haber sido observado ese año si hubiese existido un fenómeno de lente gravitacional en 2009 para una enana Y con bajo movimiento propio y desviación astrométrica importante. El límite superior en tiempo de 2039 se debe a la posible futura observación de estos eventos en telescopios de precisión aún mayor, como es el caso de WFIRST para desviaciones astrométricas.

Utilizando el catálogo de Gaia y el análisis a simple vista de las imágenes, se han encontrado doce posibles fenómenos de lente gravitacional, tres de los cuales ya han ocurrido y nueve están por ocurrir.

La masa de cada enana y su distancia al Sol, obtenida por paralaje se ha obtenido también de la bibliografía. Estos datos permiten calcular sus radios de Einstein mínimo y máximo, teniendo en cuenta las incertidumbres en la masa y en la distancia. Para los posibles fenómenos de lente gravitacional, se ha calculado la amplificación fotométrica y la desviación astrométrica, con el objetivo de caracterizarlos.

6. Resultados y discusión

6.1 Trayectorias de las enanas

Como se ha comentado en la metodología, se han tomado datos del movimiento para cada una de las enanas, los cuales se han recopilado en la tabla 3 ^{[14] [21] [15] [16] [17]}:

Tabla 3: Parámetros de movimiento propio y de paralaje en el movimiento de cada una de las enanas de la muestra.

Nombre	Mov. Propio en AR (arcsec/año)	Mov. Propio en Dec. (arcsec/año)	Paralaje (arcsec)	Excentricidad (°)	Inclinación (°)
0146	-0.452	-0.028	0.0525	29.27	-24.3
0350	-0.216	-0.579	0.1746	-72.19	-44.4
0535	-0.123	0.020	0.0664	-81.32	16.4
0647	0.002	0.388	0.1003	-83.53	46.1
0807	0.340	-0.289	0.0522	-	-
0825	-0.063	-0.233	0.1558	8.582	13.8
0830	-0.233	-2.041	0.0906	9.358	14.5
0855	-8.119	0.679	0.4389	-23.61	17.7
1405	-2.326	0.236	0.1579	60.89	44.2
1446	-0.794	-0.965	0.0992	-6.921	17.35
1541	-0.901	-0.082	0.1671	-3.104	13.12
1639	0.582	-3.100	0.2119	-46.08	11.17
1738	0.317	0.321	0.131	50.85	3.4
1828	1.017	0.174	0.1007	50.04	-4.6
1935	0.337	-0.050	-	-	-
2209	1.204	-1.357	0.1616	35.73	-25.7
2354	0.491	-0.393	0.1241	3.042	-23.4

Para los dos objetos que no tienen datos de la elipse de paralaje:

- Para la enana 0807 no se tienen datos de la diferencia entre los extremos en declinación y ascensión recta. Se ha supuesto que dicha diferencia no existe, resultando en un movimiento sinusoidal en fase en ambas componentes. Como veremos más adelante, esta enana no tiene conjunciones, así que la forma del movimiento paraláctico no es relevante.
- Para la enana 1935 no se tiene ningún dato de paralaje. La distancia al Sol se ha estimado por su luminosidad y el paralaje se supone cero debido a que el ajuste de sus posiciones en el artículo de su descubrimiento es lineal ^[17]. En cualquier caso, los errores del movimiento propio (0.079 arcsec/año en ascensión recta y 0.197 arcsec/año en declinación) provocan que el movimiento paraláctico tenga poco peso en el cálculo de la trayectoria.

Las trayectorias de cada una de las enanas vienen dadas en las siguientes figuras. En ellas está representado el campo obtenido del mapeado correspondiente (en blanco y negro) acompañado de la trayectoria de la enana, con una flecha que marca la dirección de avance. En la trayectoria está incluido el error del movimiento propio y del paralaje.

Las imágenes del campo tienen el norte arriba y el este a la izquierda y una barra que marca el flujo en la imagen, en unidades arbitrarias. Se usa escala logarítmica para las imágenes del SMSS y escala lineal para las de Pan-STARRS. Los límites de flujo se han elegido para que destaquen los elementos importantes en la imagen. Las imágenes están ordenadas por ascensión recta creciente de la enana Y.

En la trayectoria de la figura 4, la enana WISE J0146+4234B pasa a 3.63 segundos de arco de una estrella de fondo de 20.37 magnitudes en la banda g. El máximo acercamiento se da en septiembre de 2027.

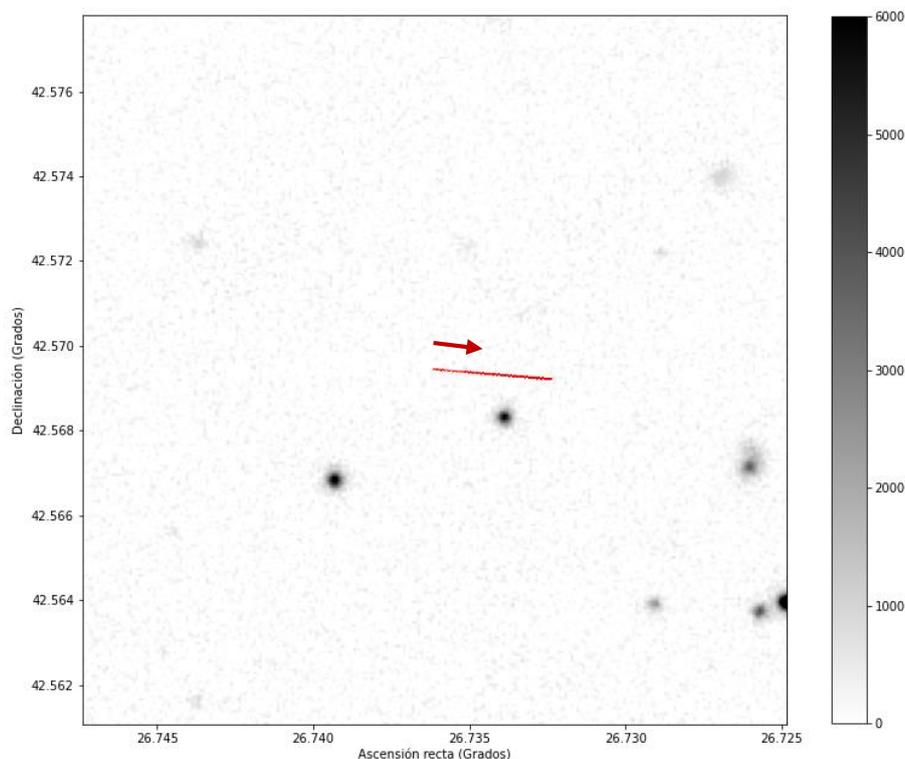


Figura 4: Trayectoria de la enana WISE J0146+4234B. Filtro: Pan-STARRS i. Campo: 60x60 arcosegundos.

Una imagen ampliada de esta conjunción aparece en la figura 5. En esta figura se puede ver claramente cómo aumenta el error del movimiento propio con el tiempo, marcado por el grosor de la trayectoria. La estrella de fondo es bastante tenue así que es improbable que se pueda medir el fenómeno de microlente, pero la enana pasa lo suficientemente cerca como para tenerlo en cuenta.

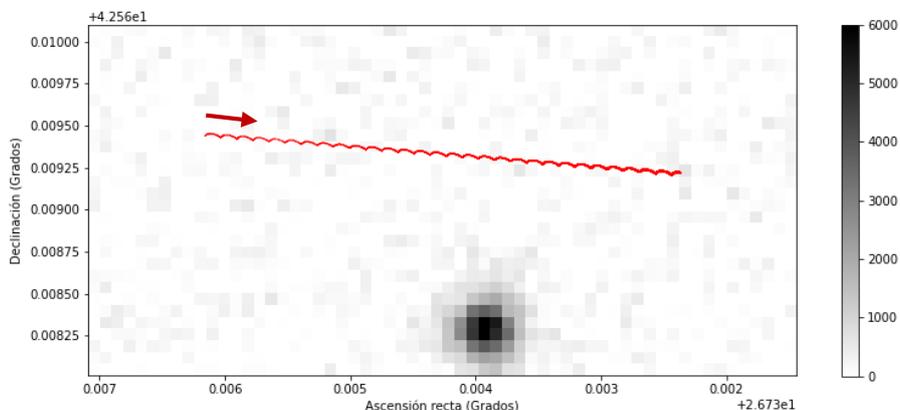


Figura 5: Trayectoria de la enana WISE J0146+4234B ampliada. Campo: 15x7.5 arcosegundos.

La enana WISE J0350-5658 se encuentra en un campo poco poblado, como se ve en la figura 6. El campo se ha ampliado para tener estrellas de fondo, ya que en la imagen de 1x1 minutos de arco no se detectaba ninguna suficientemente brillante.

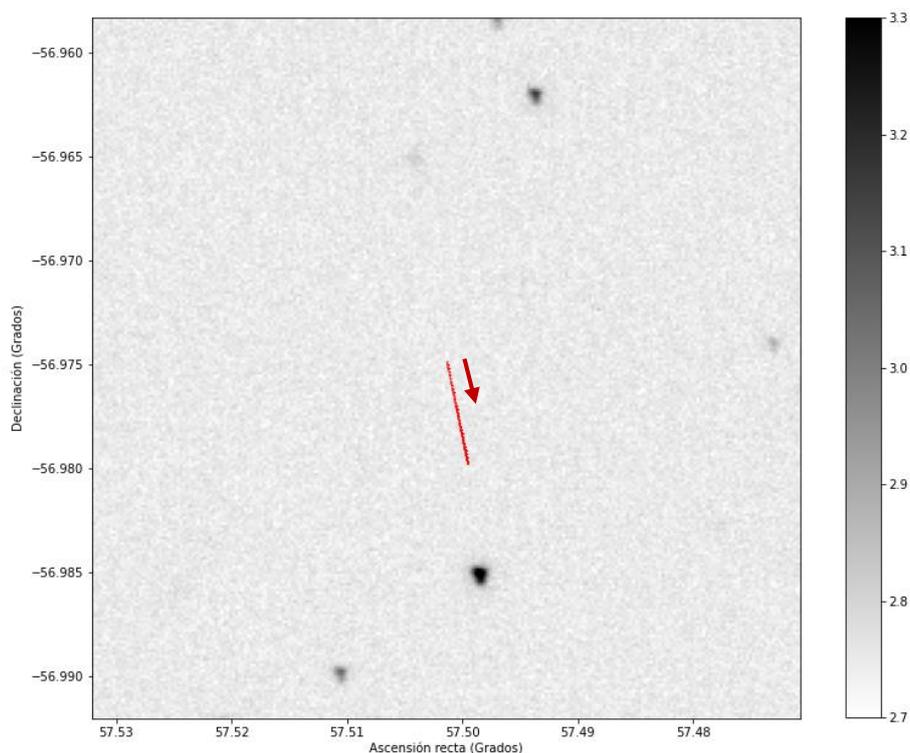


Figura 6: Trayectoria de la enana WISE J0350-5658. Filtro: SkyMapper i. Campo: 120x120 arcosegundos.

En la figura 7 se observa que la enana WISE J0535-7500 se encuentra en un campo muy poblado, pero no se dan conjunciones en los 30 años analizados debido a su bajo movimiento propio, que es el más bajo de la muestra. Esta enana pasó a alrededor de 1.5 segundos de arco de una de las estrellas de fondo que se ven en la figura, pero este

fenómeno tuvo lugar en 1975, hace demasiado tiempo como para tener datos precisos del objeto de fondo.

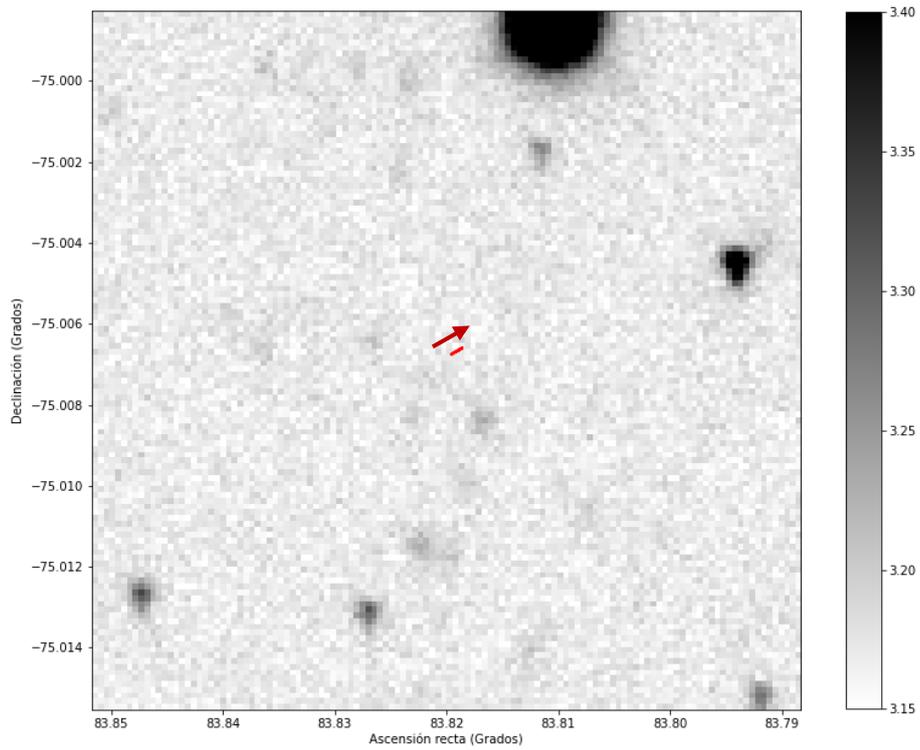


Figura 7: Trayectoria de la enana WISE J0535-7500. Filtro: SkyMapper i. Campo: 60x60 arcosegundos.

En la figura 8 se ve que la enana WISE J0647-6232 se encuentra en un campo poco poblado, lo que provoca que no existan conjunciones en los 30 años en estudio. Podría pasar cerca de una estrella muy tenue, pero esto ocurriría, aproximadamente, en 2060.

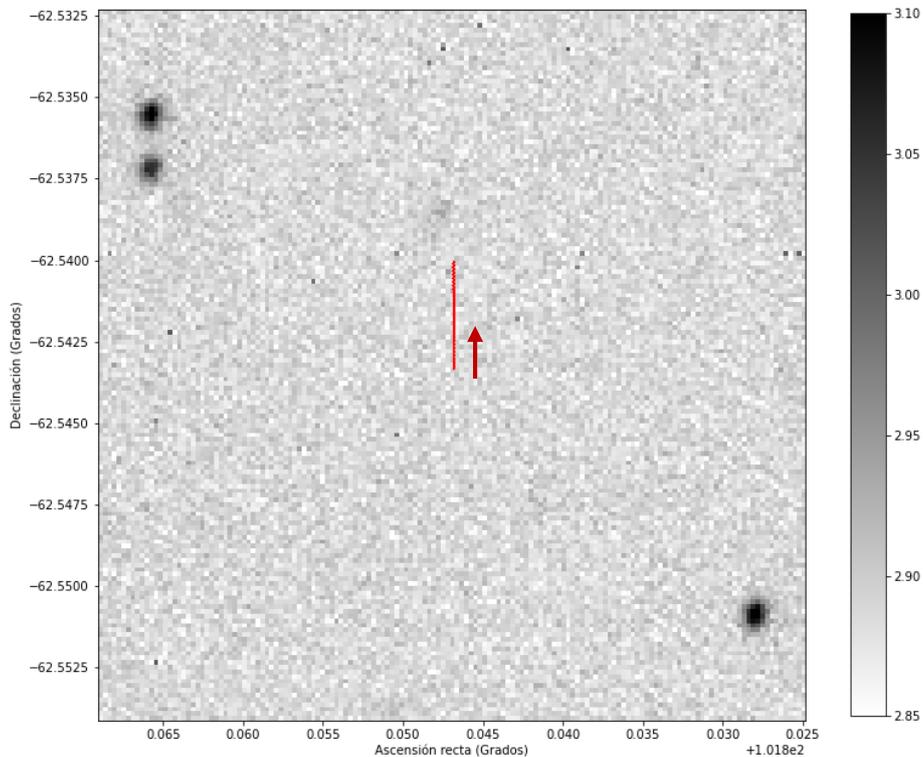


Figura 8: Trayectoria de la enana WISE J0647-6232. Filtro: SkyMapper i. Campo: 75x75 arcosegundos.

La trayectoria de la enana 0807 no parece tener conjunciones, como se ve en la figura 9. Como se ha comentado en el principio de este apartado, hay que recordar que el movimiento paraláctico de la trayectoria no es relevante, al no existir conjunciones.

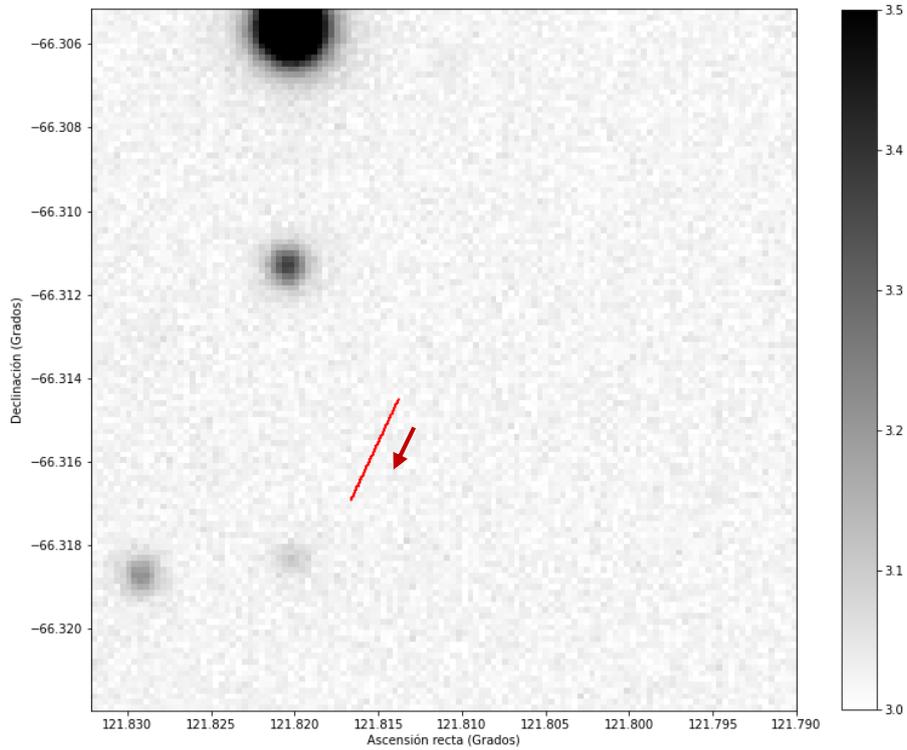


Figura 9: Trayectoria de la enana L97-3B (0807). Filtro: SkyMapper g. Campo: 60x60 arcosegundos.

En la figura 10 se ve que la enana WISE J0825+2805 no tiene conjunciones debido a su bajo movimiento propio y a las pocas estrellas que tiene en su campo.

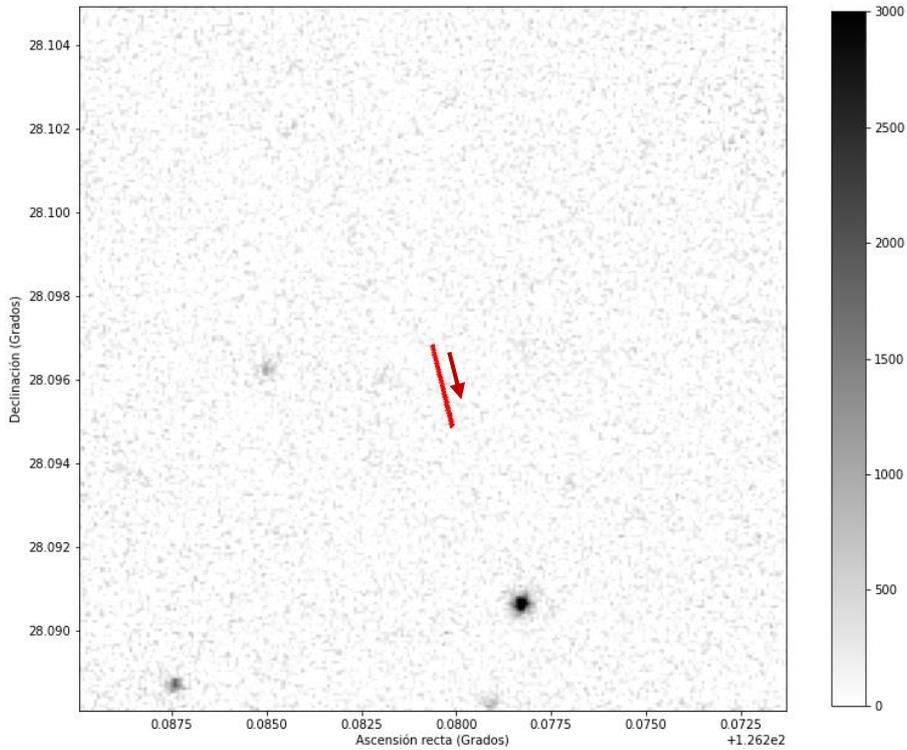


Figura 10: Trayectoria de la enana WISE J0825+2805. Filtro: Pan-STARRS i. Campo: 60x60 arcosegundos.

En la figura 11 se representa la trayectoria de la enana WISE J0830+2837, que no parece tener acercamientos a estrellas de fondo a lo largo del tiempo representado. En este caso, sin embargo, es necesario tener en cuenta que el ajuste de su trayectoria obtenido en el artículo de su descubrimiento tiene un error alto por contar con pocos puntos y puede no ser correcto. Una mayor precisión en los datos de movimiento propio y paralaje podría dar pie a que existiera alguna conjunción con una de las estrellas que se ven en la figura cercanas a su trayectoria.

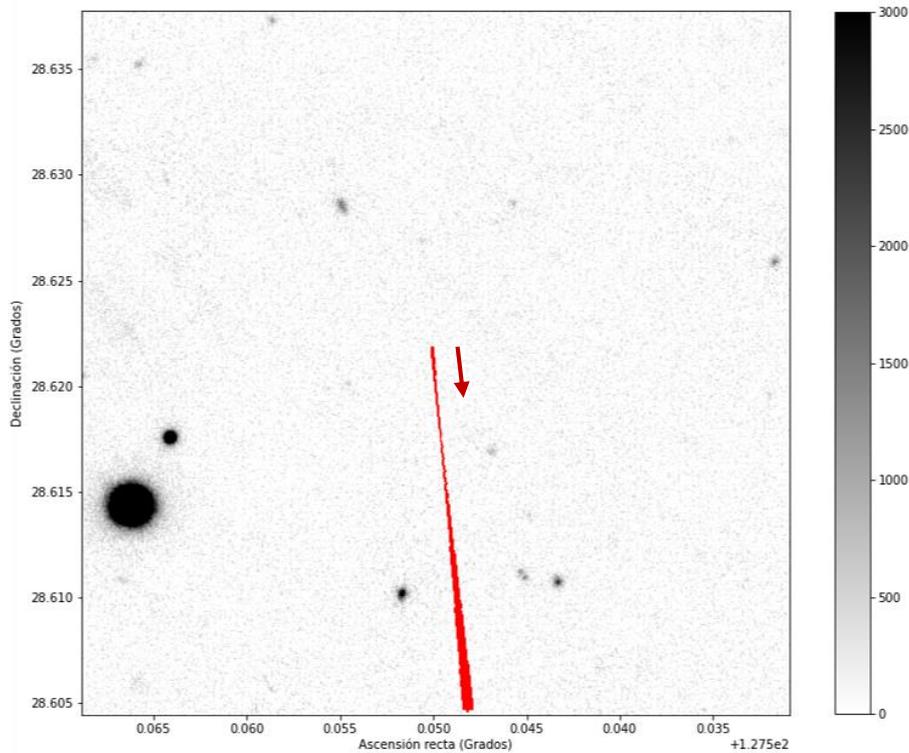


Figura 11: Trayectoria de la enana WISE J0830+2837. Filtro: Pan-STARRS i. Campo: 120x120 arcosegundos.

En la figura 12 se representa un campo de 4.75x4.75 minutos de arco. La enana WISE J0855-0714 es el cuerpo con más movimiento propio de la muestra. Es una de las más interesantes, porque su alto movimiento propio aumenta en gran medida la probabilidad de conjunciones con otros astros. Se puede ver claramente en la figura cómo la enana Y pasa cerca de una estrella de fondo, en la zona central derecha de la imagen.

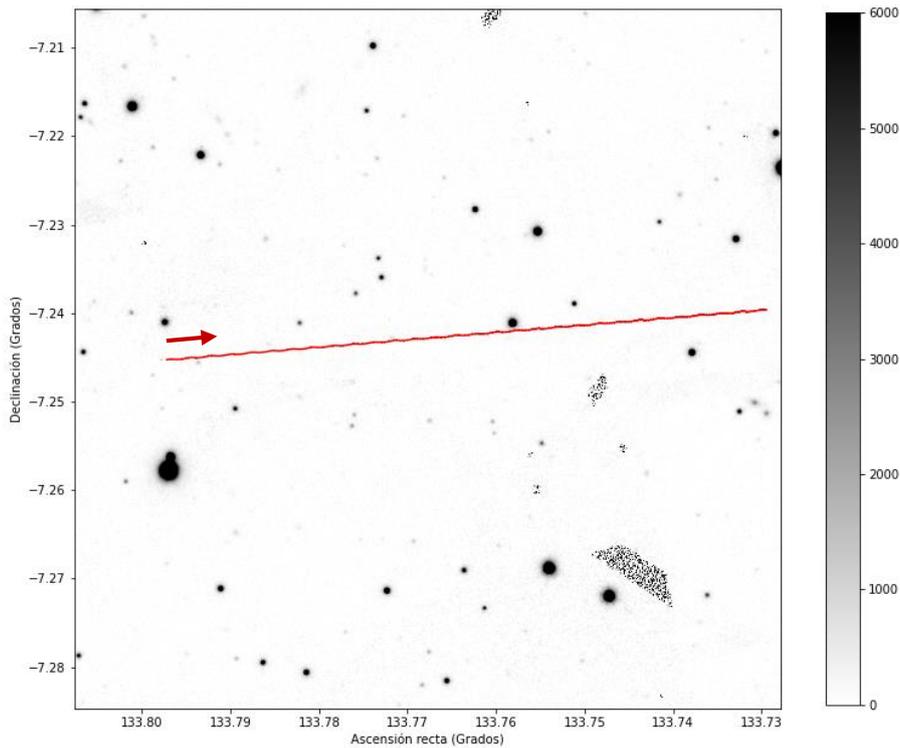


Figura 12: Trayectoria de la enana WISE J0855-0714. Filtro: Pan-STARRS i. Campo: 285x285 arcosegundos.

La estrella de fondo que se encuentra más cerca de la trayectoria tiene una magnitud de 16.37 en la banda g, el acercamiento tiene una distancia mínima de 3.04 arcosegundos y este se producirá a finales de octubre de 2026. Es una buena conjunción, pero debido a la baja masa de la enana Y, es improbable que se pueda medir este fenómeno con la instrumentación existente a día de hoy. En la figura 13 se ve ampliada la zona de la trayectoria en la que se produce este acercamiento.

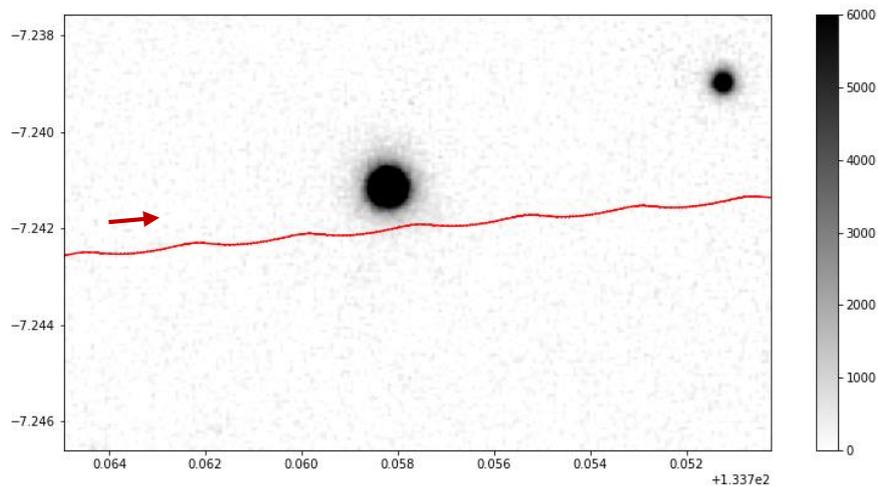


Figura 13: Ampliación de la trayectoria de la enana WISE J0855-0714 de la figura 12 en la zona en la que se produce la conjunción. Campo: 52.5x32.5 arcosegundos.

En la figura 14 se ve la enana WISE J1405+5534. Debido a las pocas estrellas que se observan en el campo, es improbable que se produzca ningún acercamiento a estrellas de fondo.

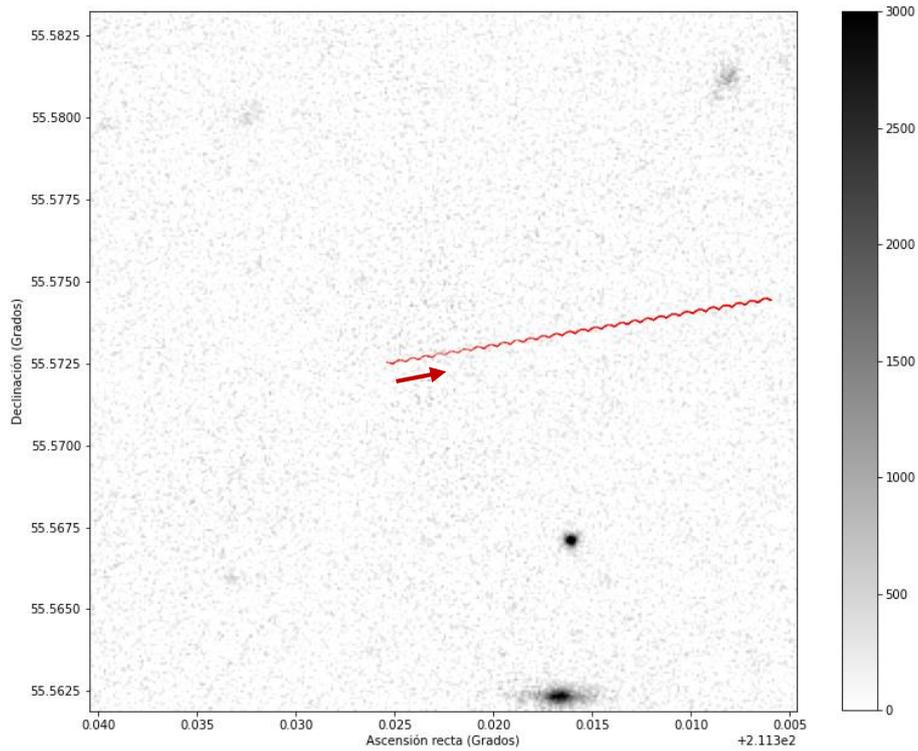


Figura 14: Trayectoria de la enana WISE J1405+5534. Filtro: Pan-STARRS i. Campo: 75x75 arcosegundos.

En la figura 15 se ve como la enana CWISE J1446-2317 no se acerca a estrellas de su campo, sin embargo, sería necesario precisar más la trayectoria para confirmar este hecho. Como se puede ver, al igual que en el caso de WISE J0830+2837 (figura 11), los valores de movimiento propio tienen un error elevado y una nueva toma de posiciones junto a un nuevo ajuste podría dar una trayectoria diferente.

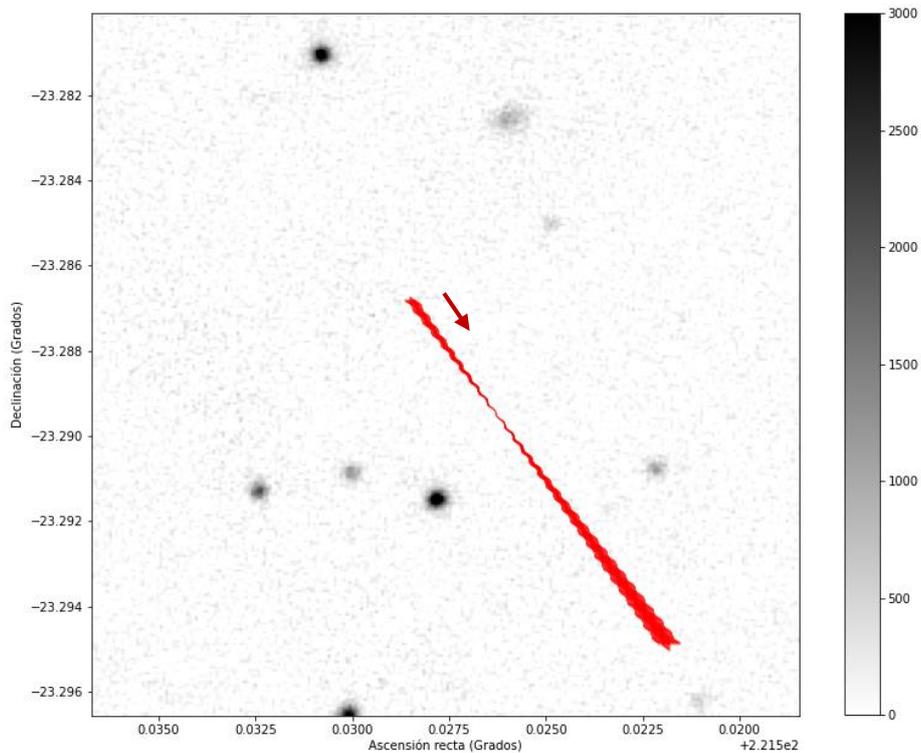


Figura 15: Trayectoria de la enana CWISE J1446-2317. Filtro: Pan-STARRS i. Campo: 60x60 arcosegundos.

La enana marrón WISE J1541-2250 de la figura 16 es una de las más interesantes de la muestra de este trabajo. A lo largo de la trayectoria estudiada se producen tres acercamientos a estrellas de fondo.

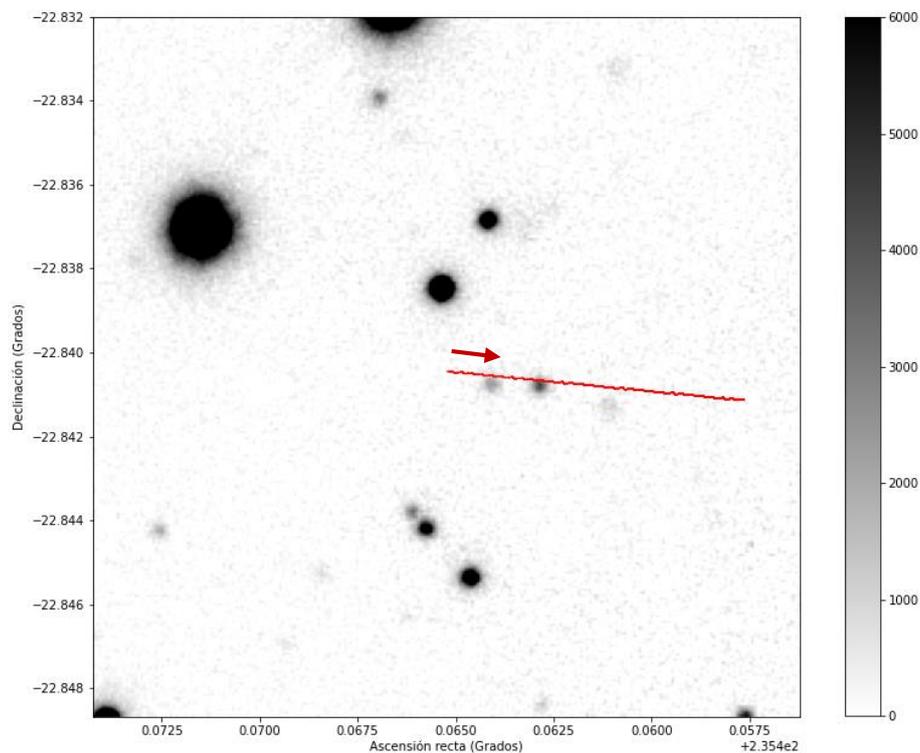


Figura 16: Trayectoria de la enana WISE J1541-2250. Filtro: Pan-STARRS i. Campo: 60x60 arcosegundos.

Los acercamientos son de 0.69, 0.61 y 1.67 arcosegundos para cada estrella. Los días de máximo acercamiento se produjeron en abril de 2014 y finales de agosto de 2018 para las dos primeras estrellas y el tercero se producirá en diciembre de 2025. Las magnitudes en la banda g de las estrellas de fondo es de 20.47 para la segunda estrella y están entre 21 y 23.1 para la primera y la tercera. La zona de la imagen de la trayectoria de la enana en la que se producen estos acercamientos se ve ampliada en la figura 17.

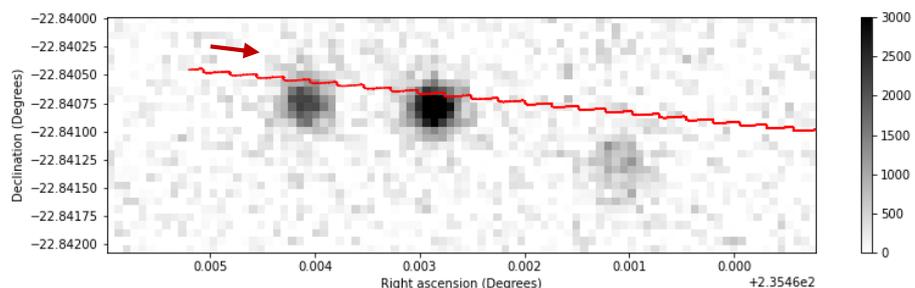


Figura 17: Ampliación de la trayectoria de la enana WISE J1541-2250 en la zona en la que se producen los acercamientos. Campo: 22.5x7.5 arcosegundos.

Representando la distancia entre esta enana y cada una de las estrellas en función del tiempo se obtiene la figura 18. En esta figura se ve la distancia entre la enana y las estrellas de fondo entre junio de 2009 y mayo de 2031. Se aprecia cómo los periodos de máximo acercamiento se dan a lo largo de, aproximadamente, dos años (dos oscilaciones). Uno de los acercamientos más interesantes de los que se observan este trabajo es el segundo de WISE J1541-2250, ya que provoca una de las mayores

desviaciones astrométricas. En el siguiente apartado se obtienen valores numéricos. Sin embargo, este fenómeno ya ha ocurrido y es muy probable que no se haya observado con la suficiente precisión.

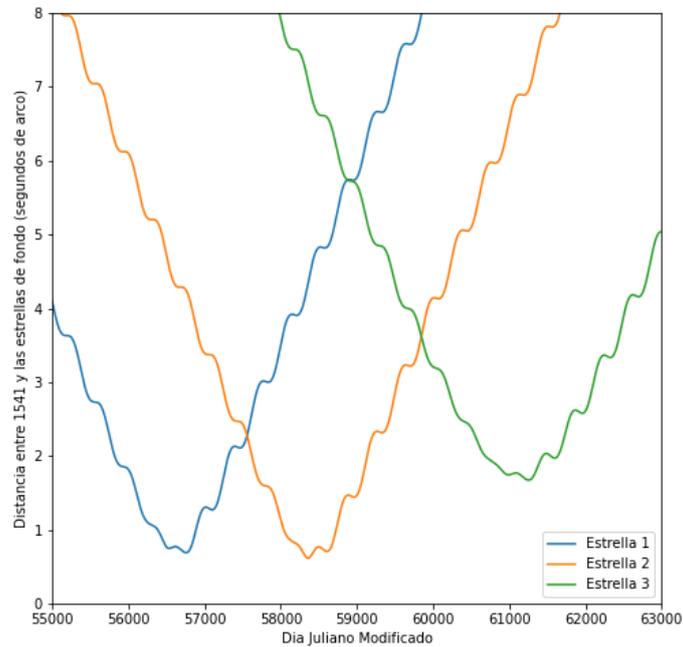


Figura 18: Distancia entre la enana WISE J1541-2250 y las estrellas de fondo.

La enana WISE J1639-6847 de la figura 19 tiene un movimiento propio muy elevado en un campo muy poblado de estrellas, por tanto, es una candidata idónea para los alineamientos que se buscan. Para esta enana Y se han encontrado tres conjunciones, una de ellas ya ha ocurrido y dos están aún por ocurrir.

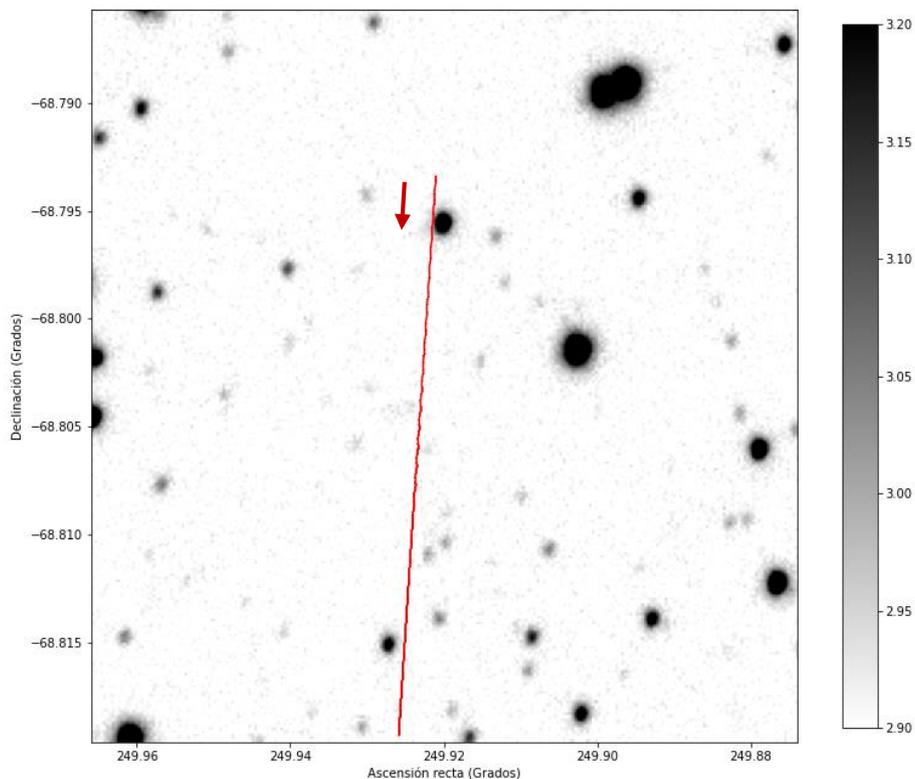


Figura 19: Trayectoria de la enana WISE J1639-6847. Filtro: SkyMapper i. Campo: 120x120 arcosegundos.

La enana pasa a 4.11, 4.5 y 1.46 segundos de arco de las estrellas de fondo. Estas tienen una magnitud en la banda g de 16.36, 20.98 y 21.18, respectivamente. La primera de las conjunciones se produjo en noviembre de 2011 y las dos siguientes se producirán en junio de 2022 y marzo de 2026. Ampliando la zona en la que ocurren los alineamientos, se obtiene la figura 20. Es importante destacar que se ha cambiado la escala con respecto a la figura 19 y que se han señalado (en naranja) las estrellas de fondo que producen los dos últimos alineamientos.

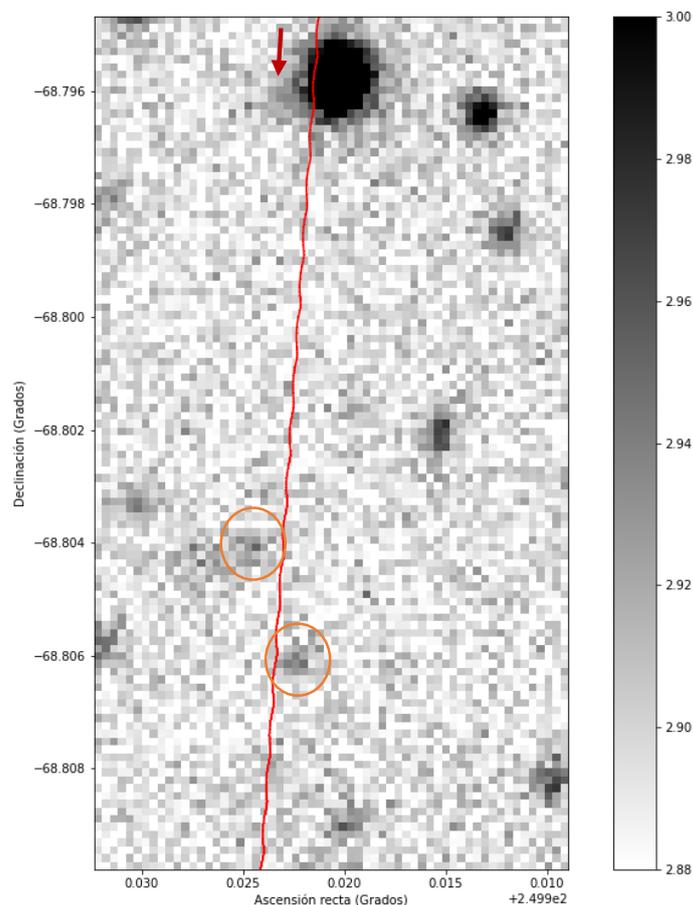


Figura 20: Ampliación de la trayectoria de la enana WISE J1639-6847 en la zona en la que se producen los acercamientos. Campo: 15x55 arcosegundos.

Representando las distancias de la enana a cada estrella en función del tiempo, se obtiene la figura 21. Como su movimiento propio es mayor que en el caso de WISE J1541-2250 (figura 18), los periodos de máximo acercamiento son más cortos (en torno a un año). De los tres acercamientos, el que provoca desviaciones y amplificaciones más grandes es el último de ellos. Los valores numéricos se darán en el apartado 6.2.

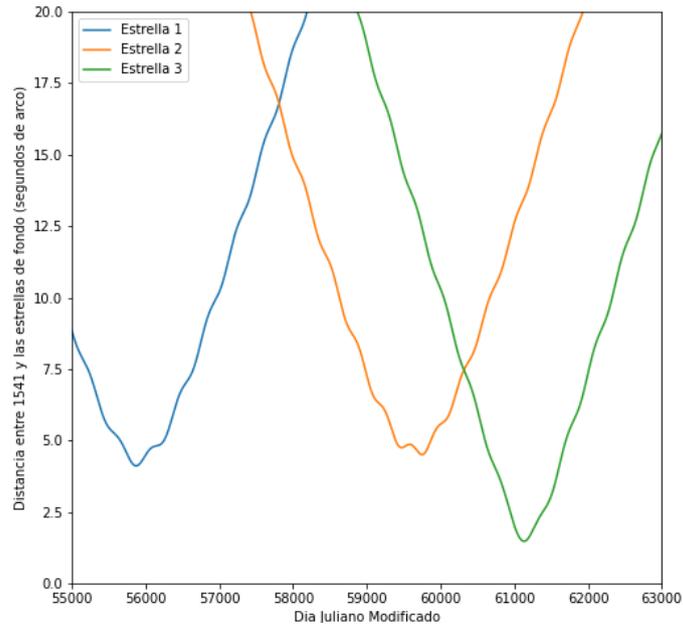


Figura 21: Distancia entre las estrellas de fondo y la enana WISE J1639-6847.

La enana WISE J1738+2732 de la figura 22 no tiene conjunciones con ninguna estrella de fondo.

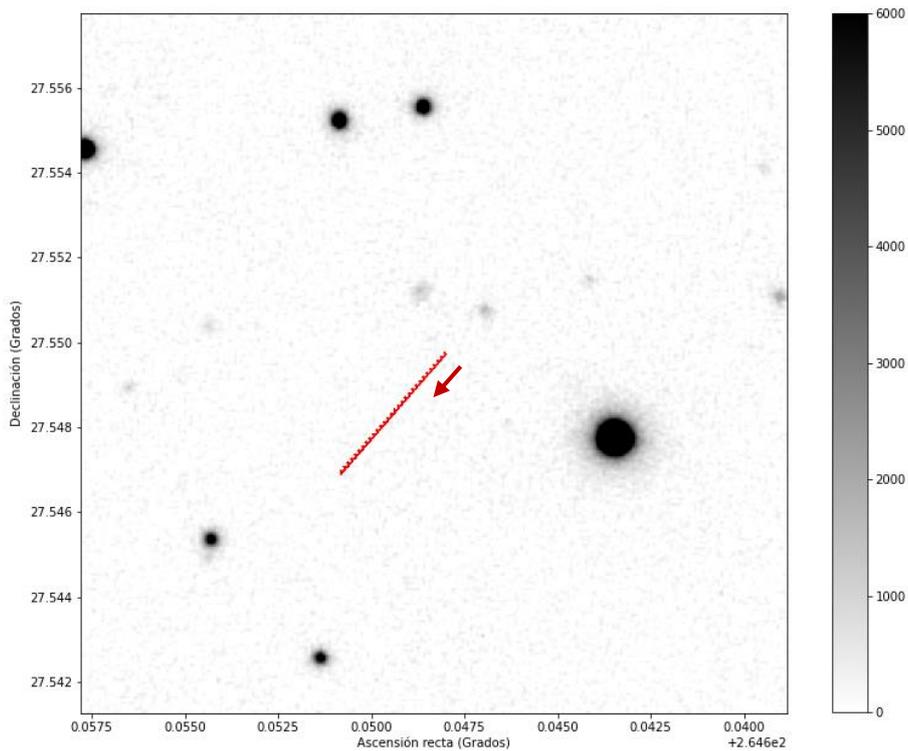


Figura 22: Trayectoria de la enana WISE J1738+2732. Filtro: Pan-STARRS i. Campo: 60x60 arcosegundos.

La enana WISE J1828+2650, como se ve en la figura 23, tiene acercamientos a dos estrellas de fondo, aunque estas son muy tenues.

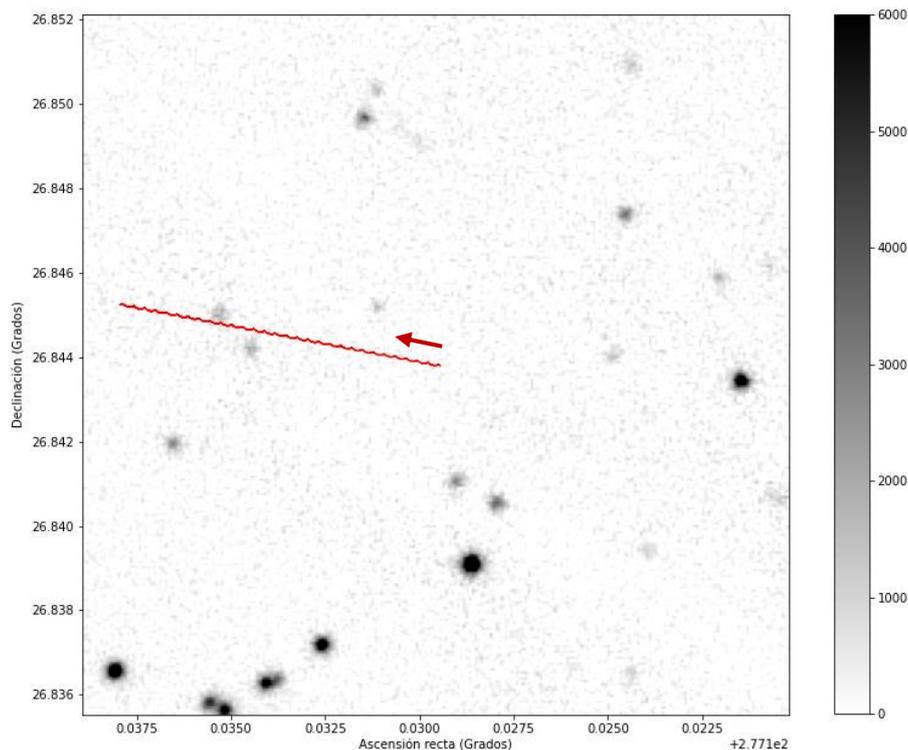


Figura 23: Trayectoria de la enana WISE J1828+2650. Filtro: Pan-STARRS i. Campo: 60x60 arcosegundos.

En la zona ampliada en la figura 24 se ha cambiado el límite superior de flujo en la imagen para que se vean más nítidamente las estrellas de fondo. Ambas se encuentran por debajo del límite de detección del catálogo de Gaia, es decir, su magnitud en la banda g es desconocida, pero sabemos que se encuentra entre 21 y 23.1. Esta restricción se explica en el apartado 6.2. La enana WISE J1639-6847 se acerca a 1.60 arcosegundos de la primera de ellas y a 0.65 arcosegundos de la segunda. Estas conjunciones se producirán en agosto de 2026 y febrero de 2030, respectivamente.

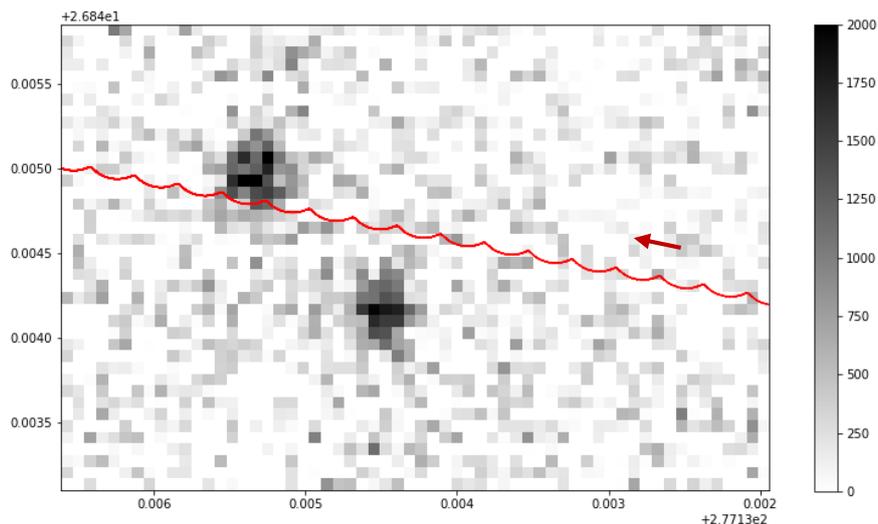


Figura 24: Ampliación de la trayectoria de la enana WISE J1828+2650 en la zona en la que se producen los acercamientos. Campo: 15x10 arcosegundos.

En la figura 25 se observa que la enana CWISE J1935-1546 es la que tiene mayor error en el movimiento propio. Para determinar si los datos que tenemos son correctos, sería necesario mejorar la precisión del ajuste. Cuando se mejore, será una candidata

interesante porque, a pesar de tener poco movimiento propio, se encuentra en un campo muy poblado, aumentando la probabilidad de que exista un fenómeno de microlente.

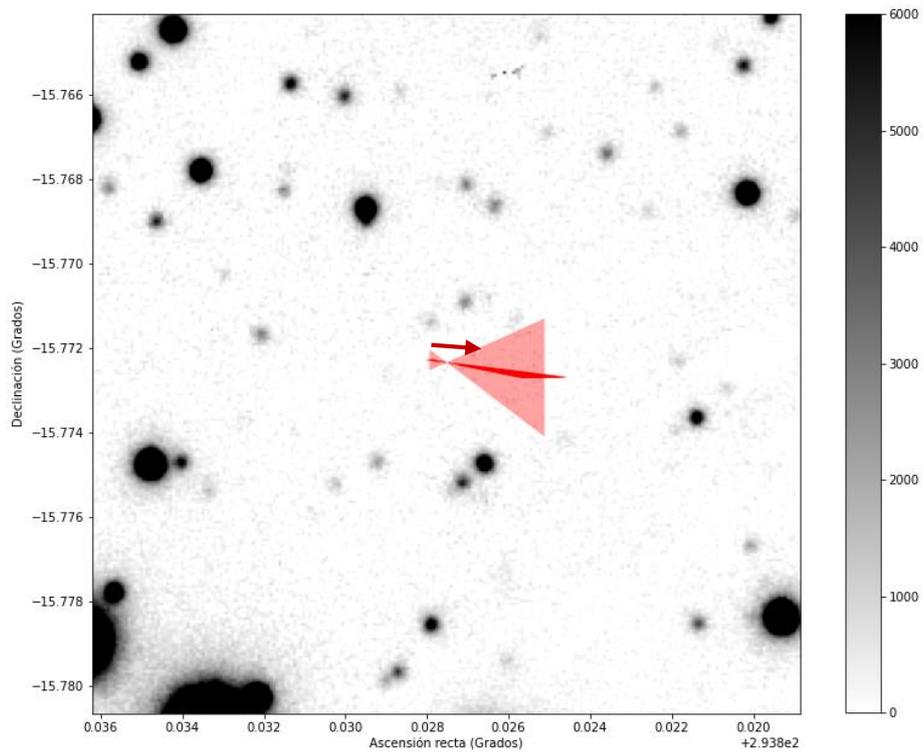


Figura 25: Trayectoria de la enana CWISE J1935-1546. Filtro: Pan-STARRS i. Campo: 60x60 arcosegundos.

La enana WISE J2209+2711 de la figura 26 tiene dos de las conjunciones más interesantes de este trabajo. La primera de ellas se da con una estrella de magnitud 13.49 en la banda g, es decir, la estrella más brillante de las vistas aquí. La segunda de ellas es la que más acercamiento tiene entre la enana y la estrella de fondo.

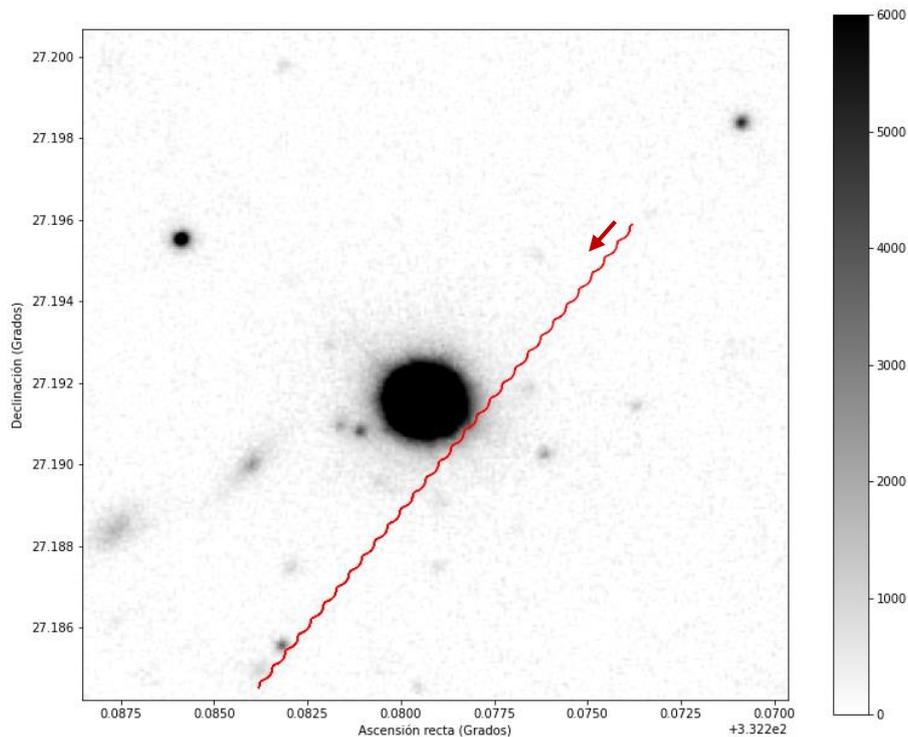


Figura 26: Trayectoria de la enana WISE J2209+2711. Filtro: Pan-STARRS i. Campo: 60x60 arcosegundos.

Como se ha comentado antes, la primera estrella de fondo tiene una magnitud de 13.49 en la banda g, mientras que la segunda tiene una magnitud de 20.97. El acercamiento es de 4.56 y 0.57 arcosegundos y las fechas en las que se producirán serán noviembre de 2023 y abril de 2037, respectivamente.

La segunda conjunción es la que tiene mayor acercamiento de toda la muestra de este trabajo y, dado que ocurre en un futuro suficientemente lejano, es probable que podamos detectarla con instrumentos más precisos capaces de observar el desplazamiento astrométrico o la amplificación fotométrica de este fenómeno.

Ampliando la zona de la imagen en la que se ven ambas conjunciones se obtiene la figura 27.

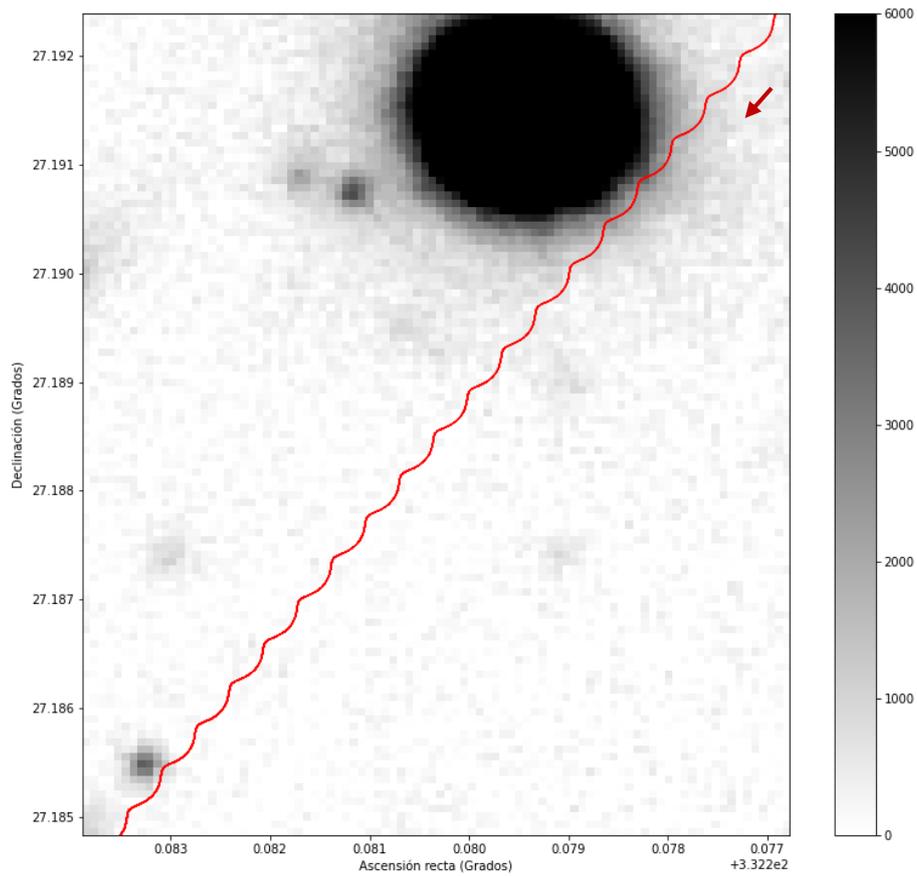


Figura 27: Ampliación de la trayectoria de la enana WISE J2209+2711 (figura 26) en la zona en la que se producen los acercamientos. Campo: 22.5x27.5 arcosegundos.

La enana WISE J2354+0240 de la figura 28 no tiene conjunciones.

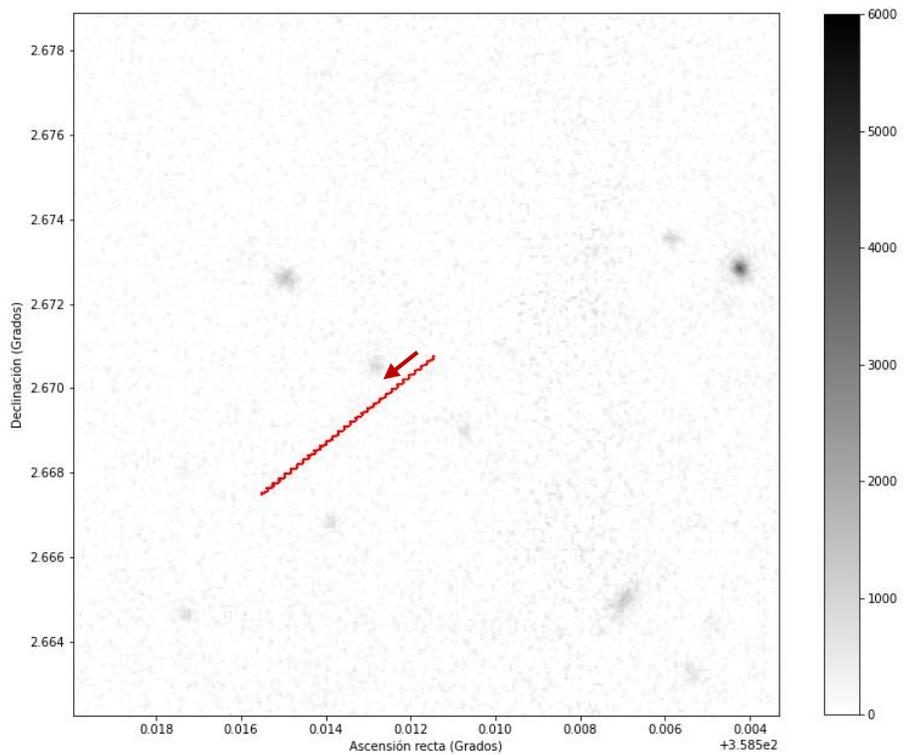


Figura 28: Trayectoria de la enana WISE J2354+0240. Filtro: Pan-STARRS i. Campo: 60x60 arcosegundos.

6.2 Fenómenos de microlente gravitacional.

Para el estudio de los posibles fenómenos de lente gravitacional es necesario conocer la amplificación fotométrica y la desviación astrométrica de cada uno de los 12 casos mencionados tanto en el apartado 5 como en el 6.1.

Partiendo de los datos de la tabla 2 y la ecuación 3 se calculan los radios de los anillos de Einstein. Se obtiene un radio mínimo para el caso de mayor distancia y menor masa, y un radio máximo para el caso de menor distancia y mayor masa. De esa forma, tenemos restringido el radio del anillo de Einstein de la enana entre los dos valores. Estos datos vienen dados en la tabla 4.

Tabla 4: Radios de Einstein de las enanas de la muestra.

Nombre	$\theta_{E\text{mín.}}$ (mas)	$\theta_{E\text{máx.}}$ (mas)
WISE J0146+4234B	1.860	3.071
WISE J0350-5658	2.105	3.491
WISE J0535-7500	2.099	3.440
WISE J0647-6232	2.051	3.388
L97-3B (LTT 3059)	1.743	2.039
WISE J0825+2805	1.988	3.298
WISE J0830+2837	1.620	3.995
WISE J0855-0714	2.372	5.528
WISE J1405+5534	3.463	5.391
CWISE J1446-2317	1.707	3.697
WISE J1541-2250	3.368	5.397
WISE J1639-6847	2.998	5.081
WISE J1738+2732	2.352	4.008
WISE J1828+2650	1.592	2.662
CWISE J1935-1546	1.538	4.635
WISE J2209+2711	3.306	5.178
WISE J2354+0240	1.754	4.829

Se ve cómo estos radios de los anillos Einstein son del orden del miliarsegundo (mas). En el caso de una conjunción perfecta, para observar un anillo de Einstein de una de estas enanas Y sería necesario un instrumento capaz de resolver 1 mas. El telescopio con mayor resolución angular en la actualidad es el VLT en modo interferométrico, que tiene una resolución de 4 mas. Con este telescopio apenas se podría detectar un anillo de Einstein de una de estas enanas para los casos óptimos de la tabla 4.

Se han detectado doce posibles fenómenos de lente gravitacional en los que la enana Y pasa a menos de 5 arcosegundos de una estrella de fondo. Estos vienen dados en la tabla 5.

Tabla 5: Posibles fenómenos de lente gravitacional entre 2009 y 2039 en las enanas Y de la muestra.

Nombre	Acercamiento máximo (arcosegundos)	Magnitud estrella de fondo (Filtro g)	Fecha de máx. acercamiento (± 5 días)
WISE J0146+4234B	3.63	20.37	22-09-2027
WISE J0855-0714	3.04	16.31	27-10-2026
WISE J1541-2250-1	0.69	21 <mag <23.1	13-04-2014
WISE J1541-2250-2	0.62	20.47	30-08-2018
WISE J1541-2250-3	1.67	21 <mag <23.1	16-12-2025
WISE J1639-6847-1	4.11	16.36	10-11-2011
WISE J1639-6847-2	4.50	20.98	20-06-2022
WISE J1639-6847-3	1.46	21.08	31-03-2026
WISE J1828+2650-1	1.60	21 <mag <23.1	13-08-2026
WISE J1828+2650-2	0.65	21 <mag <23.1	18-02-2030
WISE J2209+2711-1	4.56	13.49	10-11-2023
WISE J2209+2711-2	0.57	20.97	22-04-2037

Como se ha comentado anteriormente, las estrellas de fondo cuya magnitud en la tabla 5 está comprendida entre dos valores no aparecen en el catálogo de Gaia. El límite de detección de Gaia está en torno a 21 magnitudes^[22]. Estas estrellas, sin embargo, sí son detectadas con 5σ de significancia en Pan-STARRS, cuyo límite de detección en los filtros g, r e i es de 23.1 magnitudes^[19]. Así pues, se deduce que la magnitud de la estrella de fondo debe encontrarse entre estas dos.

La fecha de máximo acercamiento tiene una precisión de ± 5 días además del error dado por el movimiento propio y el paralaje de cada enana.

Se espera aumentar la probabilidad de predecir conjunciones de las enanas Y con estrellas de fondo mediante mapeados del cielo de mayor profundidad, como el que se obtendrá con el Large Synoptic Survey Telescope, programado para empezar a operar en 2022 y que promete llegar a una magnitud en la banda V de 27.9^[23].

Para cada posible fenómeno, se calcula el parámetro de impacto u (ecuación 4), así como la amplificación fotométrica A (ecuación 5) y el desplazamiento astrométrico $\partial\theta$ (ecuación 6), obteniendo los datos de la tabla 6.

Tabla 6: Desplazamiento astrométrico y amplificación fotométrica de los fenómenos de lente gravitacional.

Nombre	$u_{\text{mín.}}$	$u_{\text{máx.}}$	$A_{\text{mín.}} (1+)$	$A_{\text{máx.}} (1+)$	$\partial\theta_{\text{mín.}}$ (μas)	$\partial\theta_{\text{máx.}}$ (μas)
WISE J0146+4234B	1182.03	1951.61	1.379E-13	1.025E-12	0.953	2.598
WISE J0855-0714	549.93	1281.62	7.413E-13	2.187E-11	1.851	10.052
WISE J1541-2250-1	127.85	204.87	1.135E-09	7.486E-09	16.439	42.209
WISE J1541-2250-2	114.14	182.90	1.787E-09	1.178E-08	18.414	47.278
WISE J1541-2250-3	309.43	495.84	3.309E-11	2.182E-10	6.792	17.441
WISE J1639-6847-1	808.90	1370.91	5.662E-13	4.672E-12	2.187	6.281
WISE J1639-6847-2	885.65	1501.00	3.940E-13	3.251E-12	1.997	5.737
WISE J1639-6847-3	287.35	486.99	3.556E-11	2.934E-10	6.156	17.682
WISE J1828+2650-1	601.05	1005.03	1.960E-12	1.532E-11	1.584	4.429
WISE J1828+2650-2	244.18	408.29	7.197E-11	5.626E-10	3.899	10.902
WISE J2209+2711-1	880.65	1379.31	5.526E-13	3.325E-12	2.397	5.880
WISE J2209+2711-2	110.08	172.41	2.263E-09	1.362E-08	19.174	47.030

En la tabla 6 se recogen los dos parámetros principales (desplazamiento astrométrico y amplificación fotométrica) en los fenómenos de microlente gravitacional de nuestra muestra.

Lo primero que se ve es que la amplificación fotométrica provocada por las conjunciones entre nuestras enanas y las estrellas de fondo es muy pequeña. Para el caso de mayor amplificación (la segunda estrella de WISE J2209+2711, figura 27), el flujo cambiaría en $1.4 \cdot 10^{-8}$, es decir, haría falta una observación que llegase a una señal/ruido del orden de 10^8 . Con los instrumentos que existen en la actualidad, realizar una observación de estas características es prácticamente imposible.

Para el caso del desplazamiento astrométrico, sin embargo, es más viable. Gaia tiene una precisión astrométrica de $40 \mu\text{as}$ para fuentes de magnitud 14 en g y de $700 \mu\text{as}$ para fuentes de magnitud 20 en g^[22]. Para nuestros fenómenos de microlente, la precisión de Gaia no sería suficiente. Se podría intentar un análisis Bayesiano de los datos astrométricos para diferentes épocas en la segunda estrella que tiene una conjunción con la enana WISE J1541-2250, pero este análisis está fuera del alcance de este trabajo.

Como se ha comentado en el apartado 5, WFIRST podría llegar a precisiones astrométricas de $1 \mu\text{as}$ ^[24]. En ese caso, se detectarían todos los fenómenos de lente gravitacional que se predicen en este trabajo, siempre que ocurran después del lanzamiento del telescopio, propuesto para 2025. En caso de que se cumpliesen los plazos propuestos, 8 de los 12 fenómenos podrían ser observados y medidos, dando valores más precisos de la masa de estas enanas Y. Esto contribuiría a dar valores más exactos de su edad y a entenderlas mejor.

7. Conclusiones

De la muestra de 17 enanas estudiadas, se ha determinado que 6 de ellas podrían tener conjunciones con una o más estrellas de fondo entre 2009 y 2039.

En total, se han analizado 12 posibles conjunciones, dando valores posibles de los parámetros medibles en un fenómeno de lente gravitacional, que son la desviación astrométrica y la amplificación fotométrica.

Se ha concluido que el análisis de estas conjunciones a través de la amplificación fotométrica de la estrella de fondo es inviable con la instrumentación de hoy en día.

En la actualidad, el parámetro que estamos más cerca de ser capaces de medir es la desviación astrométrica. La precisión de Gaia no es suficiente para detectar estas variaciones, pero con futuros telescopios como WFIRST deberían poderse medir algunos fenómenos de microlente que ocurran durante su tiempo de vida útil. De estas mediciones se obtendrían valores precisos de la masa de las enanas Y, lo que contribuiría a conocer su edad y estado evolutivo.

8. Bibliografía

- [1] R. O. Gray y C. J. Corbally, *Stellar Spectral Classification*, Princeton University Press, 2009.
- [2] I. Baraffe, G. Chabrier, F. Allard y P. H. Hauschildt, «Evolutionary models for solar metallicity low-mass stars: mass-magnitude relationships and color-magnitude diagrams,» *Astronomy and Astrophysics*, vol. 337, pp. 403-412, 1998.
- [3] A. P. Boss, G. Basri, S. S. Kumar, J. Liebert, E. L. Martín, B. Reipurth y H. Zinnecker, «Nomenclature: Brown Dwarfs, Gas Giant Planets, and ?,» de *Brown Dwarfs, Proceedings of IAU Symposium #211*, Honolulu, 2003.
- [4] M. C. Cushing, J. D. Kirkpatrick, C. R. Gelino, R. L. Griffith, M. F. Skrutskie, A. Mainzer, K. A. Marsh, C. A. Beichman, A. J. Burgasser, L. A. Prato, R. A. Simcoe, M. S. Marley, D. Saumon y Freedma, «The discovery of y dwarfs using data from the wide-field infrared survey explorer,» *Astrophysical Journal*, vol. 743, nº 1, 2011.
- [5] S. K. Leggett, C. V. Morley, M. S. Marley y D. Saumon, «Near-infrared Photometry of Y Dwarfs: Low Ammonia Abundance and the Onset of Water Clouds,» *The Astrophysical Journal*, vol. 799, nº 1, 2015.
- [6] T. D. Brandt, T. J. Dupuy, B. P. Bowler, D. C. Bardalez Gagliuffi, J. Faherty, G. M. Brandt y D. Michalik, «A Dynamical Mass of 70 ± 5 MJup for Gliese 229B, the First T Dwarf,» *The Astronomical Journal*, vol. 160, nº 4, 2020.
- [7] S. K. Leggett, P. Tremblin, T. L. Esplin, K. L. Luhman y C. V. Morley, «The Y-type Brown Dwarfs: Estimates of Mass and Age from New Astrometry, Homogenized

- Photometry, and Near-infrared Spectroscopy,» *The Astrophysical Journal*, vol. 842, nº 2, 2017.
- [8] T. Sauer, «Nova Geminorum 1912 and the origin of the idea of gravitational lensing,» *Archive for History of Exact Sciences*, vol. 62, nº 1, pp. 1-22, 2008.
- [9] F. W. Dyson, A. S. Eddington y C. Davidson, «A Determination of the Deflection of Light by the Sun's Gravitational Field, from Observations Made at the Total Eclipse of May 29, 1919,» *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 220, pp. 291-333, 1919.
- [10] V. Belokurov, N. W. Evans, A. Moiseev, L. J. King, P. C. Hewett, M. Pettini, L. Wyrzykowski, R. G. McMahon, M. C. Smith, G. Gilmore, S. F. Sanchez, A. Udalski, S. Koposov, D. B. Zucker y C. J. Walcher, «The Cosmic Horseshoe: Discovery of an Einstein Ring around a Giant Luminous Red Galaxy,» *The Astrophysical Journal*, vol. 671, nº 1, pp. L9-L12, 2007.
- [11] K. C. Sahu, H. E. Bond, J. Anderson y M. Dominik, «Microlensing Events by Proxima Centauri in 2014 and 2016: Opportunities for Mass Determination and Possible Planet Detection,» *The Astrophysical Journal*, vol. 782, nº 2, 2014.
- [12] P. Schneider, J. Ehlers y E. E. Falco, *Gravitational Lenses*, New York: Springer Science, 1992.
- [13] M. Lingam y A. Loeb, «Brown Dwarf Atmospheres as the Potentially Most Detectable and Abundant Sites for Life,» *The Astrophysical Journal*, vol. 883, nº 2, 2019.
- [14] J. D. Kirkpatrick, E. C. Martin, R. L. Smart, A. J. Cayago, C. A. Beichman, F. Marocco, C. R. Gelino, J. K. Faherty, M. C. Cushing, A. C. Schneider, G. N. Mace, C. G. Tinney y W. R. Wright, «Preliminary Trigonometric Parallaxes of 184 Late-T and Y Dwarfs and an Analysis of the Field Substellar Mass Function into the "Planetary" Mass Regime,» *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 240, nº 2, 2019.
- [15] D. C. Bardalez Gagliuffi, J. K. Faherty, A. C. Schneider, A. Meisner, D. Caselden, G. Colin, S. Goodman, J. D. Kirkpatrick, M. Kuchner, J. Gagné, S. E. Logsdon, A. J. Burgasser y K. Allers, «WISEA J083011.95+283716.0: A Missing Link Planetary-mass Object,» *The Astrophysical Journal*, vol. 895, nº 2, 2020.
- [16] F. Marocco, J. D. Kirkpatrick, A. M. Meisner, D. Caselden, P. R. M. Eisenhardt, M. C. Cushing, J. K. Faherty, C. R. Gelino y E. L. Wright, «Improved Infrared Photometry and a Preliminary Parallax Measurement for the Extremely Cold Brown Dwarf CWISEP J144606.62-231717.8,» *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 888, nº 2, 2020.
- [17] F. Marocco, D. Caselden, A. M. Meisner, J. D. Kirkpatrick, E. L. Wright, J. K. Faherty, C. R. Gelino, P. R. M. Eisenhardt, J. W. Fowler, M. C. Cushing, R. M. Cutri, N. Garcia y T. H. Jarrett, «WISE J193518.59-154620.3: An Extremely Cold Brown Dwarf in the Solar Neighborhood Discovered with CatWISE,» *The Astrophysical Journal*, vol. 881, nº 1, 2019.

- [18] A. C. Schneider, M. C. Cushing, J. D. Kirkpatrick, C. R. Gelino, G. N. Mace, E. L. Wright, P. R. Eisenhardt, M. F. Skrutskie, R. L. Griffith y K. A. Marsh, «Hubble Space Telescope Spectroscopy of Brown Dwarfs Discovered with the Wide-field Infrared Survey Explorer,» *The Astrophysical Journal*, vol. 804, n° 2, 2015.
- [19] K. C. Chambers, E. A. Magnier, N. Metcalfe, H. A. Flewelling, M. E. Huber, C. Z. Waters, L. Denneau, P. W. Draper, D. Farrow, D. P. Finkbeiner, C. Holmberg, J. Koppenhoefer, P. A. Price, A. Rest, R. P. Saglia, E. F. Schlafly y S. J. Smartt, «The Pan-STARRS1 Surveys,» 2016.
- [20] C. Wolf, C. A. Onken, L. C. Luvaul, B. P. Schmidt, M. S. Bessell, S.-W. Chang, G. S. Da Costa, D. Mackey, T. Martin-Jones, S. J. Murphy, T. Preston, R. A. Scalzo, L. Shao y J. Smillie, «SkyMapper Southern Survey: First Data Release (DR1),» *Publications of the Astronomical Society of Australia*, vol. 35, 2018.
- [21] J. P. Subasavage, W.-C. Jao, T. J. Henry, P. Bergeron, P. Dufour, P. A. Ianna, E. Costa y R. A. Méndez, «The Solar Neighborhood. XXI. Parallax Results from the CTIOPI 0.9 m Program: 20 New Members of the 25 Parsec White Dwarf Sample,» *The Astronomical Journal*, vol. 137, n° 6, pp. 4547-4560, 2009.
- [22] L. Lindegren, J. Hernández, A. Bombrun, S. Klioner, U. Bastian, M. Ramos-Lerate, A. de Torres, H. Steidelmüller, C. Stephenson, D. Hobbs, U. Lammers, M. Biermann, R. Geyer, T. Hilger, D. Michalik, U. Stampa, P. J. McMillan y J. Castañeda, «Gaia Data Release 2. The astrometric solution,» *Astronomy & Astrophysics*, vol. 616, n° A2, 2018.
- [23] J. A. Tyson, «Large Synoptic Survey Telescope: Overview,» *Survey and Other Telescope Technologies and Discoveries*, vol. 4836, pp. 10-20, 2002.
- [24] W. A. W. Group, R. E. Sanderson, A. Bellini, S. Casertano, J. R. Lu, P. Melchior, M. Libralato, D. Bennett, M. Shao, J. Rhodes, S. T. Sohn, S. Malhotra y S. Gaudi, «Astrometry with the Wide-Field Infrared Space Telescope,» *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, vol. 5, 2019.

9. Lista de tablas y figuras

9.1 [Lista de tablas](#)

Tabla 1: Enanas Y analizadas en este trabajo.....	7
Tabla 2: Tipo espectral y rangos de temperaturas, masas y distancias de cada enana Y.	8
Tabla 3: Parámetros de movimiento propio y de paralaje en el movimiento de cada una de las enanas de la muestra.	10
Tabla 4: Radios de Einstein de las enanas de la muestra.	26
Tabla 5: Posibles fenómenos de lente gravitacional entre 2009 y 2039 en las enanas Y de la muestra.	27
Tabla 6: Desplazamiento astrométrico y amplificación fotométrica de los fenómenos de lente gravitacional.....	28

9.2 Lista de figuras

Figura 1: Espectro de una enana de tipo T tardío (T9, en rojo) con el estándar de las Y0 (en verde) ^[4]	4
Figura 2: Anillo de Einstein alrededor de una galaxia roja ^[10]	5
Figura 3: Elipse de paralaje de la enana marrón WISE 0146+4234B.....	9
Figura 4: Trayectoria de la enana WISE J0146+4234B. Filtro: Pan-STARRS i. Campo: 60x60 arcosegundos.....	11
Figura 5: Trayectoria de la enana WISE J0146+4234B ampliada. Campo: 15x7.5 arcosegundos.....	12
Figura 6: Trayectoria de la enana WISE J0350-5658. Filtro: SkyMapper i. Campo: 120x120 arcosegundos.....	12
Figura 7: Trayectoria de la enana WISE J0535-7500. Filtro: SkyMapper i. Campo: 60x60 arcosegundos.....	13
Figura 8: Trayectoria de la enana WISE J0647-6232. Filtro: SkyMapper i. Campo: 75x75 arcosegundos.....	13
Figura 9: Trayectoria de la enana L97-3B (0807). Filtro: SkyMapper g. Campo: 60x60 arcosegundos.....	14
Figura 10: Trayectoria de la enana WISE J0825+2805. Filtro: Pan-STARRS i. Campo: 60x60 arcosegundos.....	14
Figura 11: Trayectoria de la enana WISE J0830+2837. Filtro: Pan-STARRS i. Campo: 120x120 arcosegundos.....	15
Figura 12: Trayectoria de la enana WISE J0855-0714. Filtro: Pan-STARRS i. Campo: 285x285 arcosegundos.....	16
Figura 13: Ampliación de la trayectoria de la enana WISE J0855-0714 de la figura 12 en la zona en la que se produce la conjunción. Campo: 52.5x32.5 arcosegundos.....	16
Figura 14: Trayectoria de la enana WISE J1405+5534. Filtro: Pan-STARRS i. Campo: 75x75 arcosegundos.....	17
Figura 15: Trayectoria de la enana CWISE J1446-2317. Filtro: Pan-STARRS i. Campo: 60x60 arcosegundos.....	17
Figura 16: Trayectoria de la enana WISE J1541-2250. Filtro: Pan-STARRS i. Campo: 60x60 arcosegundos.....	18
Figura 17: Ampliación de la trayectoria de la enana WISE J1541-2250 en la zona en la que se producen los acercamientos. Campo: 22.5x7.5 arcosegundos.....	18
Figura 18: Distancia entre la enana WISE J1541-2250 y las estrellas de fondo.....	19
Figura 19: Trayectoria de la enana WISE J1639-6847. Filtro: SkyMapper i. Campo: 120x120 arcosegundos.....	19
Figura 20: Ampliación de la trayectoria de la enana WISE J1639-6847 en la zona en la que se producen los acercamientos. Campo: 15x55 arcosegundos.....	20
Figura 21: Distancia entre las estrellas de fondo y la enana WISE J1639-6847.....	21
Figura 22: Trayectoria de la enana WISE J1738+2732. Filtro: Pan-STARRS i. Campo: 60x60 arcosegundos.....	21
Figura 23: Trayectoria de la enana WISE J1828+2650. Filtro: Pan-STARRS i. Campo: 60x60 arcosegundos.....	22
Figura 24: Ampliación de la trayectoria de la enana WISE J1828+2650 en la zona en la que se producen los acercamientos. Campo: 15x10 arcosegundos.....	22
Figura 25: Trayectoria de la enana CWISE J1935-1546. Filtro: Pan-STARRS i. Campo: 60x60 arcosegundos.....	23

Figura 26: Trayectoria de la enana WISE J2209+2711. Filtro: Pan-STARRS i. Campo: 60x60
 arcosegundos.....24

Figura 27: Ampliación de la trayectoria de la enana WISE J2209+2711 (figura 26) en la
 zona en la que se producen los acercamientos. Campo: 22.5x27.5 arcosegundos.25

Figura 28: Trayectoria de la enana WISE J2354+0240. Filtro: Pan-STARRS i. Campo: 60x60
 arcosegundos.....25

Anexo 1: Script de Python

El script de Python está disponible en el siguiente [enlace](#). Una versión reducida se da a continuación:

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from astropy.io import fits
from google.colab import drive
import os

drive.mount('/content/gdrive', force_remount=True)

plt.rcParams["figure.figsize"]=[12,8]

#lectura de datos stack de panstarrs, se guardan los datos de cada fits en "d" + RA del objeto + Filtro
d0146g=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.2162.064.stk.g.unconv.fits')
d0146r=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.2162.064.stk.r.unconv.fits')
d0146i=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.2162.064.stk.i.unconv.fits')
d0146z=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.2162.064.stk.z.unconv.fits')
d0146y=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.2162.064.stk.y.unconv.fits')
d0825g=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1958.007.stk.g.unconv.fits')
d0825r=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1958.007.stk.r.unconv.fits')
d0825i=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1958.007.stk.i.unconv.fits')
d0825z=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1958.007.stk.z.unconv.fits')
d0825y=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1958.007.stk.y.unconv.fits')
d0830g=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1958.015.stk.g.unconv.fits')
d0830r=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1958.015.stk.r.unconv.fits')
d0830i=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1958.015.stk.i.unconv.fits')
d0830z=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1958.015.stk.z.unconv.fits')
d0830y=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1958.015.stk.y.unconv.fits')
d0855g=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1176.014.stk.g.unconv.fits')
d0855r=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1176.014.stk.r.unconv.fits')
d0855i=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1176.014.stk.i.unconv.fits')
d0855z=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1176.014.stk.z.unconv.fits')
d0855y=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1176.014.stk.y.unconv.fits')
d1405g=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.2381.082.stk.g.unconv.fits')
d1405r=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.2381.082.stk.r.unconv.fits')
d1405i=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.2381.082.stk.i.unconv.fits')
d1405z=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.2381.082.stk.z.unconv.fits')
d1405y=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.2381.082.stk.y.unconv.fits')
d1446g=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.0848.018.stk.g.unconv.fits')
d1446r=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.0848.018.stk.r.unconv.fits')
d1446i=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.0848.018.stk.i.unconv.fits')
d1446z=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.0848.018.stk.z.unconv.fits')
d1446y=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.0848.018.stk.y.unconv.fits')
d1541g=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.0851.025.stk.g.unconv.fits')
d1541r=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.0851.025.stk.r.unconv.fits')
d1541i=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.0851.025.stk.i.unconv.fits')
d1541z=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.0851.025.stk.z.unconv.fits')
d1541y=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.0851.025.stk.y.unconv.fits')
d1738g=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1908.082.stk.g.unconv.fits')
d1738r=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1908.082.stk.r.unconv.fits')
d1738i=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1908.082.stk.i.unconv.fits')
d1738z=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1908.082.stk.z.unconv.fits')
d1738y=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1908.082.stk.y.unconv.fits')
d1828g=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1911.073.stk.g.unconv.fits')
d1828r=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1911.073.stk.r.unconv.fits')
d1828i=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1911.073.stk.i.unconv.fits')
d1828z=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1911.073.stk.z.unconv.fits')
d1828y=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1911.073.stk.y.unconv.fits')
d1935g=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1038.006.stk.g.unconv.fits')
d1935r=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1038.006.stk.r.unconv.fits')
d1935i=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1038.006.stk.i.unconv.fits')
d1935z=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1038.006.stk.z.unconv.fits')
d1935y=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1038.006.stk.y.unconv.fits')
d2209g=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1924.078.stk.g.unconv.fits')
d2209r=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1924.078.stk.r.unconv.fits')
d2209i=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1924.078.stk.i.unconv.fits')
d2209z=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1924.078.stk.z.unconv.fits')
d2209y=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1924.078.stk.y.unconv.fits')
d2354g=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1322.068.stk.g.unconv.fits')
d2354r=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1322.068.stk.r.unconv.fits')
d2354i=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1322.068.stk.i.unconv.fits')
d2354z=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1322.068.stk.z.unconv.fits')
d2354y=fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/Stack/cutout_rings.v3.skycell.1322.068.stk.y.unconv.fits')
```

```

#lectura de datos del hemisferio sur, se guardan los datos de cada fits en "w" + RA del objeto + Filtro
dwarfs=['0807','0350','0535','0647','1639']
filtross=['u','g','r','i','z','v']
names=['L97-3B','WISE J0350-56','WISE J0535-75','WISE J0647-62','WISE J1639-68']

for i in np.arange(0,len(names),1):
    #os.remove('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsSMSSS/'+names[i]+'/Sumas/fechas.txt')
    for j in filtross:
        path=os.listdir('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsSMSSS/'+names[i]+'Filtro '+j+'/') #path es una lista con los
        nombres de los archivos
        path.sort() #se ordena la lista para leerlos en orden
        fecha=[] #Se inicia un array fecha en el que se guarda el dia juliano que aparece en el nombre de cada archivo
        nombre=[] #Se inicia un array en el que se guarda el nombre que va a tener cada imagen leida
        hdr=[] #se inicia un array en el que se guarda el header de la imagen
        for k in np.arange(0,len(path),1):
            nombre.append('w'+dwarfs[i]+j+str(k)) #Se le da nombre a cada foto leida
            hdr.append('hdr'+dwarfs[i]+j+str(k)) #se le da nombre a cada header
            exec("%s, %s =fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsSMSSS/'+names[i]+'Filtro '+j+'/'+path[k],
            header=True)" % (nombre[k],hdr[k])) #Se lee el .fits y el header
            fecha.append(path[k][12:20]) #se crea una lista con la fecha de las imagenes (el dia juliano que aparece en el
            nombre del archivo)
            print('Leídos los archivos warp de la estrella '+names[i]+' en el filtro '+j) #Se escribe una linea en la que se
            confirma la lectura del archivo
            unq,inv=np.unique(fecha, return_inverse=True) #Se crean dos listas, una con las fechas unicas y otro array del
            mismo tamaño que el numero de imagenes leidas que aumenta un numero cada vez que la fecha cambia
            for files in os.listdir('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsSMSSS/'+names[i]+'Sumas/Filtro '+j+'/'):
                os.remove('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsSMSSS/'+names[i]+'Sumas/Filtro '+j+'/'+files)
            with open('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsSMSSS/'+names[i]+'Sumas/fechas.txt', 'a') as arx:
                print(unq, file=arx)
            #print (unq)
            for m in np.arange(0,len(unq),1):
                lsum=[]
                for l in np.arange(0,len(inv),1):
                    if inv[l]==m:
                        exec("lsum.append(%s)" %nombre[l]) #se unen las imagenes de la misma fecha en un array
                        print("añadido "+nombre[l]+" a la suma") #Se confirma la adición de la imagen
                    else: pass
                suma='ws'+dwarfs[i]+j+str(unq[m]) #se da el nombre a cada suma
                asuma='a'+dwarfs[i]+j+str(m+1) #se crea otro array de nombres para escribir el archivo
                exec("%s=np.sum(lsum,axis=0)" %suma) #se suman los arrays de sumas para dar una imagen suma
                exec("%s=fits.PrimaryHDU(%s,header=%s)" % (asuma,suma,hdr[m])) #se pasa a .fits para escribirla
                exec("%s.writeto('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsSMSSS/'+names[i]+'Sumas/Filtro
                '+j+'/'+suma+'.fits',overwrite=True)" %asuma) #se escribe el archivo suma en el drive
                print('Guardado el archivo de sumas '+suma+'.fits') #se confirma la escritura del archivo

#sumas de los datos del hemisferio sur para aumentar SNR
dwarfs=['0807','0350','0535','0647','1639']
filtross=['u','g','r','i','z','v']
names=['L97-3B','WISE J0350-56','WISE J0535-75','WISE J0647-62','WISE J1639-68']

for i in np.arange(0,len(names),1):
    for j in filtross:
        path=os.listdir('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsSMSSS/'+names[i]+'Sumas/Filtro '+j+'/') #path es una lista
        con los nombres de los archivos suma en este caso
        path.sort() #se ordena la lista para leerlos en orden
        fecha=[] #Se inicia un array fecha en el que se guarda el dia juliano que aparece en el nombre de cada archivo
        nombre=[] #Se inicia un array en el que se guarda el nombre que va a tener cada imagen leida
        hdr=[] #se inicia un array en el que se guarda el header de la imagen
        for k in np.arange(0,len(path),1):
            nombre.append('w'+dwarfs[i]+j+str(k)) #Se le da nombre a cada foto leida
            hdr.append('hdr'+dwarfs[i]+j+str(k)) #se le da nombre a cada header
            exec("%s, %s =fits.getdata('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsSMSSS/'+names[i]+'Sumas/Filtro '+j+'/'+path[k],
            header=True)" % (nombre[k],hdr[k])) #Se lee el .fits y el header
            fecha.append(path[k][7:11]) #se crea una lista con la fecha de las imagenes (el año de cada imagen)
            print('Leídos los archivos suma de la estrella '+names[i]+' en el filtro '+j) #Se escribe una linea en la que se
            confirma la lectura del archivo
            unq,inv=np.unique(fecha, return_inverse=True) #Se crean dos listas, una con las fechas unicas y otro array del
            mismo tamaño que el numero de imagenes leidas que aumenta un numero cada vez que la fecha cambia
            for m in np.arange(0,len(unq),1):
                lsum=[]
                for l in np.arange(0,len(inv),1):
                    if inv[l]==m:
                        exec("lsum.append(%s)" %nombre[l]) #se unen las imagenes de la misma fecha en un array
                        print("añadido "+nombre[l]+" a la suma") #Se confirma la adición de la imagen
                    else: pass
                suma='ws'+dwarfs[i]+j+str(unq[m]) #se da el nombre a cada suma
                asuma='a'+dwarfs[i]+j+str(m+1) #se crea otro array de nombres para escribir el archivo
                exec("%s=np.sum(lsum,axis=0)" %suma) #se suman los arrays de sumas para dar una imagen suma
                exec("%s=fits.PrimaryHDU(%s,header=%s)" % (asuma,suma,hdr[m])) #se pasa a .fits para escribirla
                exec("%s.writeto('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsSMSSS/'+names[i]+'Sumas/Sumas/Filtro
                '+j+'/'+suma+'.fits',overwrite=True)" %asuma) #se escribe el archivo suma en el drive
                print('Guardado el archivo de sumas '+suma+'.fits') #se confirma la escritura del archivo

```

```

#Se asigna una eclipse de movimiento paralactico a cada enana, para calcular los máximos de la variación en AR y en
DEC provocados por el paralaje.
#La elipse tiene de eje mayor el paralaje y de eje menor el paralaje por el seno de beta. Además, se encuentra girada
un ángulo dado por la inclinación de la elipse.
# Enana      AR      DEC      MP AR      MP DEC      Para.      Beta      Inc.
# WISE J0146+42B 01:46:56.66 +42:34:10.0 -0.452 -0.028 0.0525 29.27 -24.3
# WISE J0350-56 03:50:00.32 -56:58:30.2 -0.216 -0.579 0.1746 -72.19 -44.4
# WISE J0535-75 05:35:16.80 -75:00:24.9 -0.123 +0.020 0.0664 -81.32 16.4
# WISE J0647-62 06:47:23.23 -62:32:35.5 +0.002 +0.388 0.1003 -83.53 46.1
# L97-3B 08:07:14.67 -66:18:48.7 +0.340 -0.289 0.0522
# WISE J0825+28 08:25:07.33 +28:05:47.6 -0.063 -0.233 0.1558 8.582 13.8
# WISE J0830+28 08:30:11.95 +28:37:16.0 -0.233 -2.041 0.0906 9.358 14.3
# WISE J0855-07 08:55:10.74 -07:14:42.5 -8.119 +0.679 0.4389 -23.61 17.7
# WISE J1405+55 14:05:18.40 +55:34:21.5 -2.326 +0.236 0.1579 60.89 44.2
# WISE J1446-23 14:46:06.62 -23:17:17.8 -0.794 -0.965 0.0992 -6.921 17.35
# WISE J1541-22 15:41:51.65 -22:50:25.2 -0.901 -0.082 0.1671 -3.104 13.12
# WISE J1639-68 16:39:40.84 -68:47:39.4 +0.582 -3.100 0.2119 -46.08 11.17
# WISE J1738+27 17:38:35.58 +27:32:58.3 +0.317 +0.321 0.131 50.85 3.4
# WISE J1828+26 18:28:31.08 +26:50:37.8 +1.017 +0.174 0.1007 50.04 -4.6
# WISE J1935-15 19:35:18.59 -15:46:20.3 +0.337 -0.050
# WISE J2209+27 22:09:05.75 +27:11:43.6 +1.204 -1.357 0.1616 35.73 -25.7
# WISEA? J2354+02 23:54:02.79 +02:40:14.1 +0.491 -0.393 0.1241 3.042 -23.4
#Parametizamos las elipses por un argumento alfa que va de 0 a 2pi. Así, cada ecuación tiene la siguiente forma:
#Paralaje-P, alfa-a, inclinación-i, beta-b
#x=P*cos(a)*cos(i)-P*sin(b)*sin(a)*sin(i)
#y=P*cos(a)*sin(i)+P*sin(b)*sin(a)*cos(i)
nombres=['WISE J0146+42B','WISE J0350-56','WISE J0535-75','WISE J0647-62','WISE J0825+28','WISE J0830+28','WISE
J0855-07','WISE J1405+55','WISE J1446-23','WISE J1541-22','WISE J1639-68','WISE J1738+27','WISE J1828+26','WISE
J2209+27','WISE J2354+02']
def xel(P,a,b,i):
    return P*np.cos(a)*np.cos(np.radians(180-i))-P*np.sin(np.radians(b))*np.sin(a)*np.sin(np.radians(180-i))
def yel(P,a,b,i):
    return P*np.cos(a)*np.sin(np.radians(180-i))+P*np.sin(np.radians(b))*np.sin(a)*np.cos(np.radians(180-i))
a=np.linspace(0,2*np.pi,1000)
params=[[0.0525,29.27,-24.3],[0.1746,-72.19,-44.4],[0.0664,-81.32,16.4],[0.1003,-
83.53,46.1],[0.1558,8.582,13.8],[0.0906,9.358,14.3],[0.4389,-23.61,17.7],[0.1579,60.89,44.2],[0.0992,-
6.921,17.35],[0.1671,-3.104,13.12],[0.2119,-46.08,11.17],[0.131,50.85,3.4],[0.1007,50.04,-4.6],[0.1616,35.73,-
25.7],[0.1241,3.042,-23.4]]
for i in params:
    x=xel(i[0],a,i[1],i[2])
    y=yel(i[0],a,i[1],i[2])
    pl.plot(x,y)
    pl.gca().invert_xaxis()
    pl.gca().set_aspect('equal', share=True)
    pl.xlabel('Variación ascensión recta')
    pl.ylabel('Variación declinación')
    pl.savefig('/content/gdrive/MyDrive/TFM/Figuras Movimiento/elipse'+nombres[params.index(i)]+'.png')
    pl.show()
    print("%.5f, %.5f"%(max(x),max(y)))
    print(np.argmax(x), np.argmax(y), np.argmin(x), np.argmin(y), "\n")
#2--1000
#Desf--max(x)-max(y)

#calculo de radios de einstein: REins=((4*G*M)/(c^2*D))^(1/2)
#G es la const. grav; M es la masa de la enana y D su distancia a la tierra. Tenemos los siguientes datos.
#El radio de einstein es maximo para la distancia minima y masa maxima y es minimo para la distancia maxima y masa
minima.
G=6.6743015E-11 #m^3/(kg*s^2)
Mj=1.898E27 #kgs por masa de jupiter
mjms=1/1047.348 #masa de jupiter en masas solares
c=299792458 #m/s
PaM=30856804799935500 #metros por parsec
nombres=['WISE J0146+42B','WISE J0350-56','WISE J0535-75','WISE J0647-62','L97-3B','WISE J0825+28','WISE
J0830+28','WISE J0855-07','WISE J1405+55','WISE J1446-23','WISE J1541-22','WISE J1639-68','WISE J1738+27','WISE
J1828+26','WISE J1935-15','WISE J2209+27','WISE J2354+02']
datos=np.loadtxt('/content/gdrive/MyDrive/TFM/reins.txt',usecols=[1,2,3,4])
i=0
while i<len(nombres):
    reminap=3E-3*np.sqrt(datos[i][0]*mjms/(datos[i][3]/1000))*1000
    remaxap=3E-3*np.sqrt(datos[i][1]*mjms/(datos[i][2]/1000))*1000
    print(nombres[i]+" %.5e, %.5e" %(reminap,remaxap))
    i=i+1

#calculo de amplificacion fotometrica
distancias=np.asarray([3.63,3.04,0.69,0.616,1.67,4.11,4.50,1.46,1.60,0.65,4.56,0.57])
remin=np.asarray([1.860,2.372,3.368,3.368,3.368,2.998,2.998,1.592,1.592,3.306,3.306])
remax=np.asarray([3.071,5.528,5.397,5.397,5.397,5.081,5.081,2.662,2.662,5.178,5.178])
u1=distancias*1000/remin
u2=distancias*1000/remax
print(u1)
print(u2)
amas1=1/2*((u1**2+2)/(u1*np.sqrt(4+u1**2))+1)
amas2=1/2*((u2**2+2)/(u2*np.sqrt(4+u2**2))+1)
amenos1=1/2*((u1**2+2)/(u1*np.sqrt(4+u1**2))-1)
amenos2=1/2*((u2**2+2)/(u2*np.sqrt(4+u2**2))-1)
atot1=(u1**2+2)/(u1*np.sqrt(4+u1**2))-1
atot2=(u2**2+2)/(u2*np.sqrt(4+u2**2))-1

aaprox1=2/u1**4
aaprox2=2/u2**4
print(aaprox1)
print(aaprox2)

#calculo de desplazamiento fotometrico se multiplica por 1000 para obtenerlo en microarcosegundos
dmax=u2*remax/(u2**2+2)*1000
dmin=u1*remin/(u1**2+2)*1000
print(dmax)
print(dmin)

daprox1=remax/u2*1000
daprox2=remin/u1*1000

```

```

pl.rcParams["figure.figsize"]=[13,13]
#Creamos un array de dias a partir del dia juliano 55000 centrado en la epoca 2014.0 (1/1/2014), que empieza en junio
de 2009 y que finaliza en julio de 2039.
dias=np.linspace(55000-56658.5,66000-56658.5,num=2201)

#El procedimiento descrito a continuacion se realiza con todas las enanas para superponer su trayectoria sobre las
imágenes leídas antes. Por cuestión de brevedad, se dara el proceso seguido con solo una de ellas.

#Enana WISE 1541: calculo de trayectoria

#coordenadas el dia 2456658.5 (1/1/2014):
ra0=235.464060
dec0=-22.840555
#Valores del movimiento propio
rav=-0.9012/365
decv=-0.0824/365
errormovpr=1.2
#Movimiento paralactico y angulo beta
movpar=0.16275
movpdec=0.03894
angra=-0.139*np.pi
angdec=0.783*np.pi
errpar=2.3

#La variacion en cada coordenada depende del movimiento por dia modulado por una funcion seno o coseno con la
variacion de cada coordenada
def ar1541(dia): #el cero de la grafica de la variacion de ar coincide con el dia de inicio de dicha grafica, pero
nuestra grafica esta bajando mientras que el seno sube, por tanto se introduce un offset de -pi
ar=ra0+rav/3600*dia+movpar/3600*np.sin(2*np.pi/373.3*dia+angra)
return ar
def dec1541(dia):
dec=dec0+decv/3600*dia+movpdec/3600*np.sin(2*np.pi/373.3*dia+angdec)
return dec
def err1541(dia):
error=errpar/3600/1000+abs(dia)*errormovpr/365/3600/1000 #dividido entre 365 para poder calcularlo cada dia, entre
3600 y 1000 para pasar de mas a grados
return error

#Calculamos la ascension recta y declinacion
pl.imshow(d1541i, origin='lower',extent=[235.4742542,235.4562083,-22.8486817,-
22.8319906],aspect=1.081,vmax=6000,vmin=0, cmap='binary') #se toma el aspecto para que los pixeles sean cuadrados
pl.colorbar(shrink=0.82)
pl.errorbar(ar1541(dias),dec1541(dias),yerr=err1541(dias),xerr=err1541(dias), color='r',errorevery=1)
pl.xlabel('Ascension recta (Grados)')
pl.ylabel('Declinacion (Grados)')
pl.savefig('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/WISE J1541-22/Trayectoria.png')
pl.show()

pl.errorbar(ar1541(dias),dec1541(dias),yerr=err1541(dias),xerr=err1541(dias), color='r',errorevery=1) #clavada,
limites un pelin mas pequeños, los del paper son mierda
pl.xlim(235.4649,235.4631)
pl.ylim(-22.8407,-22.8404)
pl.show()

pl.errorbar(ar1541(dias),dec1541(dias),yerr=err1541(dias),xerr=err1541(dias), color='r',errorevery=1)
pl.imshow(d1541i[95:125,110:200], origin='lower',extent=[235.465983,235.459216,-22.8420748,-
22.8399884],aspect=1.081,vmax=3000,vmin=0, cmap='binary') #se toma el aspecto para que los pixeles sean cuadrados
pl.colorbar(shrink=0.82/3)
pl.xlabel('Right ascension (Degrees)')
pl.ylabel('Declination (Degrees)')
pl.savefig('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/WISE J1541-22/TrayectoriaCerca.png')
pl.show()

#Distancias con las estrellas cercanas:
dist1=np.sqrt((235.46410-ar1541(dias))**2+(-22.84075-dec1541(dias))**2)
pl.plot(dias,dist1)
pl.show()
diamin=dias[np.argmin(dist1)]
print(np.min(dist1)*3600,diamin+56658.5) #distancia en arcsec, dia en mjd
#13-04-2014

#Distancias con las estrellas cercanas:
dist2=np.sqrt((235.46288506948-ar1541(dias))**2+(-22.84083580279-dec1541(dias))**2)
pl.plot(dias,dist2)
pl.show()
diamin=dias[np.argmin(dist2)]
print(np.min(dist2)*3600,diamin+56658.5) #distancia en arcsec, dia en mjd
#30-08-2018

#Distancias con las estrellas cercanas:
dist3=np.sqrt((235.46104-ar1541(dias))**2+(-22.84131-dec1541(dias))**2)
pl.plot(dias,dist3)
pl.show()
diamin=dias[np.argmin(dist)]
print(np.min(dist3)*3600,diamin+56658.5) #distancia en arcsec, dia en mjd
#03-08-2026

pl.rcParams["figure.figsize"]=[8,8]
pl.plot(dias+56658.5,dist1*3600,label='Estrella 1')
pl.plot(dias+56658.5,dist2*3600,label='Estrella 2')
pl.plot(dias+56658.5,dist3*3600,label='Estrella 3')
pl.xlim(55000,63000)
pl.ylim(0,8)
pl.xlabel('Dia Juliano Modificado')
pl.ylabel('Distancia entre 1541 y las estrellas de fondo (segundos de arco)')
pl.legend()
pl.savefig('/content/gdrive/My Drive/TFM/fitsPST/WISE J1541-22/Distancia.png')
pl.show()

```