



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE POSGRADO EN ASTROFÍSICA

Instituto de Astronomía

**Interferometría de motas de estrellas de Hipparcos
con el equipo astronómico DRAGON**

TESIS

PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS (ASTRONOMÍA)

PRESENTA
FEDERICO ORTIZ TREJO

TUTOR
Dr. Valeri Orlov
Instituto de Astronomía
UNAM

MÉXICO, D.F., MARZO 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatoria

A mi familia.

”Al final llegamos hasta los límites más remotos de nuestros telescopios. En ellos medimos sombras y, entre fantasmagóricos errores de medidas, buscamos señales apenas más sustanciales”.

Edwin Hubble

Agradecimientos

Al Dr. Valeri Orlov Romanenko, mi asesor, por su infinita paciencia y sabios consejos.

A los miembros del jurado:

Dr. Valeri Orlov

M. en C. Christine Allen

Dr. Valeri Voytsekhovich

Dr. Stan Kurtz

Dr. Luis José Herminio Corral Escobedo

Al PAPIIT IN102514, por los recursos económicos proporcionados, que hizo posibles, las noches de observación, en el OAN de Tonantzintla, Puebla y San Pedro Mártir, Baja California, México.

A la Dra. Leticia Carigi, por su apoyo en la coordinación del posgrado del instituto de astronomía.

A la Profa. Carmen Tenorio del CCH Naucalpan por su apoyo en la coordinación del PIA. A la Profa. Adela Campuzano del CCH Naucalpan por su corrección en la ortografía, aclarando que los errores son exclusivamente míos.

Índice general

Dedicatoria	III
Agradecimientos	V
Resumen	XIX
1. Clasificación de estrellas binarias	1
§1.1. Introducción a las estrellas binarias	1
§1.2. Clasificación de estrellas binarias	2
§1.3. Estrellas binarias astrométricas	2
§1.4. Estrellas Binarias Fotométricas o Eclipsantes	4
§1.5. Estrellas Binarias Espectroscópicas	5
§1.6. Estrellas Binarias de Ocultación	6
§1.7. Estrellas Binarias Visuales	6
§1.8. Estrellas Binarias cercanas	7
2. Ecuaciones de Movimiento	9
§2.1. Ecuaciones de Movimiento para un Sistema Binario	9
§2.2. Solución de la Ecuación de Movimiento	10
§2.3. Ecuación de la Órbita y La Primera Ley de Kepler	15
§2.4. Elementos Orbitales	16
§2.5. Segunda y Tercera ley de Kepler	17
3. Ecuaciones de movimiento de estrellas binarias	21
§3.1. Ecuaciones de movimiento de estrellas binarias visuales	21
§3.2. Estrellas binarias astrométricas	23
§3.3. Estrellas Binarias Espectroscópicas	23
§3.4. La separación angular y el paralaje en la ecuación de movimiento	25

4. Interferometría de motas	27
§4.1. Seeing astronómico	27
§4.2. El ancho total a media altura (FWHM) del <i>seeing disc</i>	29
§4.3. r_0 y t_0	30
§4.4. Descripción matemática de r_0 y t_0	31
§4.5. El modelo de Kolmogorov de la turbulencia	32
§4.6. El <i>seeing</i> ligado a la Tierra	34
§4.7. Descripción básica de las técnicas	37
§4.8. Desplazar y sumar	39
§4.9. Interferometría de motas como solución a la distorsión atmosférica	40
5. Interferometría de motas con el equipo astronómico Dragon	43
§5.1. Equipo astronómico Dragon	43
§5.2. Características técnicas del equipo	45
§5.3. Acumulador de marcos	47
§5.4. Algunas posibles investigaciones experimentales con el equipo DRAGON	47
§5.5. Comparación de los sensores del frente de onda de la Óptica Adaptativa	48
§5.6. Calidad del guiado del telescopio	50
§5.7. Problema Anisoplanático en Sistemas Adaptativos	51
§5.8. Sensado de la Curvatura del Frente de Onda de la Imagen y Tomografía Atmosférica	53
§5.9. Comprobación de resultados en el Observatorio Astronómico Nacional de Tonantzintla	54
6. Interferometría de Motas en el telescopio del OAN-Tonanzintla	59
§6.1. Antecedentes	59
§6.2. Interferometría de Motas en el OAN. Telescopio de 1m, Tonantzintla, Pue. México.	63
7. Interferometría de Motas en los telescopios del OAN-San Pedro Mártir, B.C., México.	65
§7.1. Interferometría de Motas en el OAN. Telescopio de 1.5m, San Pedro Mártir, B. C., México.	65
§7.2. Interferometría de Motas en el OAN. Telescopio de 2.1m, San Pedro Mártir, B. C., México.	66
§7.3. Interferometría de Motas en el OAN. Telescopio de 1.5m y 2.1m, San Pedro Mártir, B. C., México.	67

8. Descripción del procesamiento de imágenes	69
§8.1. Muestra de estrellas de Hipparcos	69
§8.2. Posiciones relativas	69
§8.3. Movimiento propio	71
§8.4. Lista de 826 estrellas analizadas del catálogo Hipparcos	73
§8.5. Primer procesamiento	97
§8.6. Segundo procesamiento	97
§8.7. Tercer procesamiento	100
§8.8. Cuarto procesamiento	101
9. Resultados y conclusiones.	103
§9.1. Resultados	103
§9.2. HIP59540	106
§9.3. HIP87313	109
§9.4. HIP62018	111
§9.5. Conclusiones	113
A. SPECKLE INTERFEROMETRY AT THE OBSERVATORIO ASTRONÓMICO NACIONAL. I	115
§A.1. Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica, 45, 155-159 (2009)	
V. G. Orlov, V. V. Voitsekhovich, G. A. Mendoza-Valencia, A. Svyryd, J. L. Rivera, F. Ortiz, and C. A. Guerrero.	
Received 2009 April 17; accepted 2009 June 1	115
B. SPECKLE INTERFEROMETRY AT THE OBSERVATORIO ASTRONÓMICO NACIONAL. II	121
§B.1. Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica, 46, 245-251 (2010)	
V. G. Orlov, V. V. Voitsekhovich, J. L. Rivera, C. A. Guerrero, and F. Ortiz.	
Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México, México.	
Received 2010 March 27; accepted 2010 May 27	121
C. Características y funciones básicas de la cámara de video CCD Cam3	129
§C.1. Introducción	129

§C.2. Vista general de la aplicación CCTV	130
§C.3. Iniciando	130
§C.4. Configuración de la cámara	133
§C.5. Configuración de los canales	135
§C.6. Previsualización de video en vivo	137
§C.7. Protocolos	138
§C.8. Protocolo de acumulación de datos	139
§C.9. Operaciones avanzadas	142
D. Bibliografía	143

Índice de figuras

1.	Imagen CCD de Albireo (β Cygni) tomada por Bob Franke. La separación es $34.7''$. El Norte está arriba y el Este a la izquierda. Bob Franke	XXI
1.1.	Trayectoria oscilante de la estrella Sirio, mostrando esquemáticamente las órbitas de ambas componentes, en torno al centro de gravedad común. La línea recta representa el movimiento propio del centro de masa común, mientras que las curvas representan los movimientos relativos de ambas estrellas en torno al centro de masa. La amplitud de estas curvas, está relacionada con las masas de las dos estrellas.	3
1.2.	Diagrama esquemático, donde se muestra un ejemplo de binarias eclipsantes, mostrando un eclipse total, parcial y anular con su correspondiente curva de luz.	4
1.3.	Esquema de un sistema binario espectroscópico. La longitud de onda de la luz de la estrella que se aleja del observador se hace más larga; se corre al rojo y la longitud de onda de la luz de la estrella que se acerca al observador se hace más corta; se corre al azul.	5
2.1.	Radio vector \mathbf{r} de la estrella M1 a la estrella M2 en un marco de referencia inercial arbitrario	9
2.2.	El vector momento angular \mathbf{k} es perpendicular al radio vector \mathbf{r} al vector velocidad $\dot{\mathbf{r}}$. Debido a que \mathbf{k} es un vector constante, el movimiento de la estrella M_2 , está restringido al plano perpendicular al vector \mathbf{k}	11
2.3.	La órbita de un objeto en el campo gravitacional de otro, es una sección cónica; elipse, parábola o hipérbola. El vector \mathbf{e} apunta en la dirección del pericentro, donde el objeto está más cerca del objeto central. Si el objeto central es el Sol, esta dirección se le llama perihelio, si es otra estrella periastro, si es la Tierra perigeo. La anomalía verdadera f se mide desde el pericentro.	13

2.4.	Se necesitan seis constantes de integración para describir la órbita de la estrella M_2 . Estas constantes pueden ser elegidas de varias formas. (a) . Si la órbita es calculada numéricamente, la elección más simple es usar los valores iniciales del radio vector y el vector velocidad. (b) . Otra posibilidad es usar el momento angular (\mathbf{k}) , la dirección del periaastro (\mathbf{e}) , que da la excentricidad y el tiempo del periaastro (τ) . (c) . El tercer método que mejor describe la geometría de la órbita, consiste en tomar las constantes del nodo ascendente Ω , el ángulo del periaastro ω , la inclinación de la órbita i , el semieje mayor a , la excentricidad e y el tiempo del periaastro τ	16
2.5.	Vectores unitarios $\hat{\mathbf{e}}_{\mathbf{r}} = \hat{\mathbf{e}}_{\mathbf{f}}$ del sistema de coordenadas polares. Las direcciones de estos vectores cambian mientras el planeta o estrella se mueve a lo largo de su órbita.	18
3.1.	En 1830 la órbita de ξ Ursae Majoris fué la primer órbita determinada observacionalmente.	21
3.2.	Las componentes de un sistema binario se mueven alrededor del centro de masa común. A_1 y A_2 denotan las posiciones de las estrellas en los instantes A, B y C.	22
3.3.	Las trayectorias aparentes en el cielo de Sirio A y su compañera Sirio B. . .	23
3.4.	Espectro del sistema binario espectroscópico κ Arietis. En el espectro de arriba las líneas son individuales, mientras que en el de abajo las líneas son dobles. Observatorio Lick.	24
4.1.	Diagrama esquemático ilustrando cómo los frentes de onda ópticos de una estrella distante pueden ser perturbados por una capa de mezcla turbulenta en la atmósfera. La escala vertical de la representación de los frentes de onda está altamente exagerada.	32
4.2.	La división de la apertura de telescopio en N subaperturas efectivas, de acuerdo a la ecuación 4.8. [1]	35
4.3.	La relación entre las frecuencias espaciales en el plano imagen y las separaciones en plano apertura del telescopio. [1]	36
4.4.	Imagen-exposición corta típica de una estrella binaria (HIP85371), como se ve a través del <i>seeing</i> atmosférico. Cada estrella debe aparecer como un solo punto, pero la atmósfera hace que las imágenes de las dos estrellas se dividan en dos patrones de manchas (un patrón de arriba a la izquierda, y el otro abajo a la derecha). Las motas se mueven alrededor rápidamente, de modo que cada estrella aparece como una única mancha borrosa en imágenes de larga exposición de 1 minuto. (Telescopio de 1.5m OAN-San Pedro Martir, Ensenada, Baja California, México. 9 de abril del 2009, 3:39 tiempo local). .	38

4.5. Imagen promediada, de una estrella binaria (HIP87313). Se promediaron 1500 imágenes con un tiempo de exposición de 10 ms. (Telescopio de 1.5m OAN-San Pedro Martir, Ensenada, Baja California, México. 9 de Mayo del 2009, 4:51 tiempo local).	40
5.1. El esquema óptico del interferómetro de motas. 1- El típico filtro de interferencia R. 2- Lentes Ópticos. 3-Detector (camara CCD). 4- Acumulador de marcos (frames). 5-Computadora. [12]	45
5.2. Cámara CCD. 1-Intensificador de luz, 2-Unidad de enfriamiento Peltier, 3-Ventilador. [12]	46
5.3. Esquema para la estimación experimental de la calidad de la prueba de Shack-Hartmann [12]	49
5.4. Arreglo experimental para de guiado del telescopio; $[x(t), y(t)]$ son las coordenadas del centroide de la imagen dependientes del tiempo. [12]	50
5.5. Sensado del frente de onda de óptica adaptativa con el uso de una estrella guia de referencia [12]	52
5.6. Arreglo experimental para investigaciones anisoplanáticas. [12]	53
5.7. Sensibilidad límite de la camara CCD. Cúmulo del Trapecio θ Ori, exposición de 20-ms, mostrando estrellas de hasta 11 (mag). [12]	55
5.8. Datos de guiado del telescopio: marco único de 1 segundo de integración mostrando estrellas con separación de hasta 19 segundos de arco, [12]. . . .	55
5.9. Datos de guiado del telescopio: desplazamiento del cetroide de la imagen en segundos de arco como función del tiempo. [12]	56
5.10. Imágenes de corta exposición distorsionadas por la turbulencia de la binaria en Leo (Magnitudes visuales de 2.6 y 3.8 respectivamente, separación angular 5"). [12]	57
6.1. El esquema óptico del interferómetro de motas. 1- El típico filtro de interferencia R. 2- Lentes ópticos. 3-Detector (camara CCD). 4- Acumulador de marcos (frames). 5-Computadora. [12]	60
6.2. La imagen de la izquierda (A) es una imagen de motas antes del procesamiento de datos (raw data). La imagen de la derecha (B) es la imagen de motas después de l procesamiento de datos. [12]	61
6.3. Espectro de potencias (PS) (Izquierda) y función de autocorrelación (ACF) (derecha) de ADS 4841. [12]	62
6.4. Observaciones de ADS 7769. [12]	63
8.1. Vista del telescopio (izquierda) y vista de binoculares (derecha).	70

8.2. Gráfico que muestra las posiciones relativas de un sistema binario, indicando la separación angular ρ y el ángulo de posición θ	70
8.3. Movimiento propio μ de una estrella.	71
8.4. Componentes del movimiento propio en la esfera celeste. El Polo Norte celeste, el punto vernal es V, el movimiento propio de la estrella en la esfera celeste viene designado por las flechas. El vector de movimiento propio es μ , α es la ascensión recta, δ es la declinación y θ es el ángulo de posición.	72
8.5. Rutina "WinerFilter3.pro" IDL. [12]	98
8.7. Rutina ".acfdragnw2.pro" IDL. [12]	98
8.6. Imagen procesada por Fig.8.5 para resolver el sistema y leer las componentes y y x del sistema HIP85371	99
8.8. Patrón de interferencia de la imagen procesada por Figura (8.7) del sistema HIP85371	99
8.9. Rutina longexpdrag1.pro IDL. [12]	100
8.10. Imagen del sistema resuelto, procesada por Fig.8.9 del sistema HIP85371	101
8.11. Rutina "WinerFilter3.pro" IDL. [12]	102
8.12. Imagen de mas alto contraste, procesada por Fig.8.11 del sistema HIP85371	102
9.1. Imagen de la función de autocorrelación (ACF), procesada por Fig.8.5. HIP72463	105
9.2. Espectro de potencias (PSF), procesado por Fig.8.5. HIP72463	105
9.3. Imagen de motas, procesado por Fig.8.9. HIP72463	106
9.4. Imagen de motas de alto contraste, procesada por Fig.8.11. HIP72463	106
9.5. Imagen de la función de autocorrelación (ACF), procesada por Fig. (8.5). HIP59540	107
9.6. Espectro de potencias (PSF), procesado por Fig.8.5. HIP59540	107
9.7. Imagen de motas, procesado por Fig.8.9. HIP59540	108
9.8. Imagen de motas de alto contraste, procesada por Fig.8.11. HIP59540	108
9.9. Imagen de la función de autocorrelación (ACF), procesada por Fig.8.5. HIP87313	109
9.10. Espectro de potencias (PSF), procesado por Fig.8.5. HIP87313	109
9.11. Imagen de motas, procesado por Fig.8.9. HIP87313	110
9.12. Imagen de motas de alto contraste, procesada por Fig.8.11. HIP87313	110
9.13. Imagen de la función de autocorrelación (ACF), procesada por Fig.8.5. HIP62018	111
9.14. Espectro de potencias (PSF), procesado por Fig.8.5. HIP62018	112
9.15. Imagen de motas, procesado por Fig.8.9. HIP62018	112
9.16. Imagen de motas de alto contraste, procesada por Fig.8.11. HIP62018	113

C.1. Instalación y ejecución del software.	130
C.2. Ventana de inicio.	131
C.3. Sección superior izquierda - Zona oscura.	132
C.4. Comando para manipulación de la imagen.	133
C.5. Opción para iniciar el ajuste de los parámetros de la cámara.	134
C.6. Ventana para ajustar los parámetros de la cámara.	134
C.7. Ventana para salvar la configuración deseada del CCD.	136
C.8. Ventana para iniciar la configuración de la cámara.	136
C.9. Ventana de diálogo para configuración de la cámara CCD.	136
C.10. Inicio de la grabación de la cámara CCD.	137
C.11. Inicio de la previsualización de la cámara CCD.	137
C.12. Apagado de la previsualización de la cámara CCD.	138
C.13. Lista de comandos.	139
C.14. Inicio de acumulación de imagen	139
C.15. Ventana de captura de imagen.	140
C.16. Ventana de diálogo.	141
C.17. Pantalla con información extendida sobre acumulación y controladores de enfriadores del CCD	141
C.18. Cuando todos los datos sean acumulados, los datos del protocolo se mostrarán en la pantalla.	142
C.19. Filtrado y procesamiento de imágenes.	142

Índice de tablas

6.1. Resultado de las mediciones en el telescopio de 1-m de Tonantzintla, de los parámetros de varias binarias. El ángulo de posición se expresa en grados con la habitual ambigüedad de 180^0 , la separación en segundos de arco. [12]	62
8.1. Lista de los 826 sistemas del catálogo Hipparcos analizados con el software del equipo DRAGON, incluyendo notaciones r,w,y,x generadas después del primer y segundo procesamiento.	97
9.1. Lista de 39 sistemas binarios de Hipparcos confirmados. El sistema HIP72463, en negritas, no aparece en el catálogo WDS, pero si aparece en Simbad y en el catálogo de Hipparcos.	104

Resumen

El presente trabajo, es el resultado de haber estudiado 826 estrellas variables dobles del catálogo HIPPARCOS, con el método de interferometría de motas. Ésta técnica es muy útil, cuando la separación angular ρ , de las estrellas es muy pequeña, para ser determinada por otros métodos o resulta muy costosa su determinación, seguimiento y estudio.

La investigación sobre el movimiento de las estrellas binarias es un importante problema astronómico, debido a que es la única forma directa de medir la masa estelar. Los sistemas binarios separados ($\rho > 1''$), pueden ser observados fácilmente por los astrónomos, pero los sistemas binarios cercanos ($\rho < 1''$) se dificultan. Muchos de estos sistemas binarios cercanos no pueden resolverse en dos estrellas, sin el uso de métodos especiales. Un gran avance en el estudio de estrellas binarias visuales comenzó con la publicación de Labeyrie (1970), donde se presentó la técnica de interferometría de motas (*speckle interferometry*, en idioma inglés). Esta técnica nos permitió alcanzar la resolución del límite de difracción, del telescopio, usando métodos especiales para la reducción de las imágenes de corta exposición, descritos en éste trabajo (Capítulos 5, 6, 7, 8) y en Orlov et al (2007), (2009), (2010), (2011), (2012).

La técnica de interferometría de motas surgió formalmente con Labeyrie (1970) [5]. La interferometría de motas nos permitió la medición de sistemas binarios cercanos, donde recuperamos la información de las posiciones relativas de los componentes en sistemas binarios y múltiples con una precisión dada por el límite de difracción del instrumento. Para el desarrollo de esta técnica, aplicada a nuestro trabajo, obtuvimos múltiples imágenes de poco tiempo de exposición, a las cuales les calculamos el centro fotométrico de manera individual y posteriormente se revisaron todas las exposiciones, usando análisis de Fourier. Al terminar este análisis, obtuvimos la distancia angular ρ , entre las componentes de un sistema binario (capítulo 1) y la posición relativa θ de las mismas.

La aplicación de la técnica de interferometría de motas permite realizar interesantes y valiosos estudios científicos, incluso con un telescopio relativamente pequeño. Por

ejemplo, utilizando los datos obtenidos con un telescopio de 1-m, como el del OAN (Observatorio Astronómico Nacional) en Tonantzintla, Puebla, México, pudimos llegar hasta 0,1 segundos de arco de resolución. La resolución alcanzada, es suficiente para estudiar muchos sistemas binarios visuales y sistemas de estrellas múltiples.

Encontramos una razón de 826:39, lo que nos da aproximadamente una proporción de 21:1 de estrellas individuales a binarias, es decir, nos da un porcentaje para los sistemas binarios del 4.7 % para el catálogo Hipparcos.

El Catálogo de Estrellas Dobles Washington (Washington Double Star Catalog - WDS, por sus siglas en inglés), fué otra fuente importante para el desarrollo de este trabajo. El WDS incluye notas para más de 84,000 componentes de sistemas binarios o múltiples (Mason et al. 2001). Sin embargo, sólo alrededor de 2,000 órbitas han sido calculadas hasta el momento, de acuerdo a lo que nos mencionan Hartkopf y Mason (2003); Cvetkovic y Novákovic (2006).

Estudiar la naturaleza de las estrellas dobles, significa encontrar las condiciones mínimas necesarias para conocer la probabilidad de que la pareja sea óptica, de movimiento propio común (MPC), de origen común o física. Para su estudio es necesario que nos basemos en la aplicación de varios criterios. Estos criterios los podemos dividir en empíricos, estadísticos y astrofísicos.

Como muchas ramas de la astronomía, la observación de estrellas dobles puede ser apreciada en varios niveles. Para quienes disfrutan el cielo nocturno, las estrellas dobles ofrecen una de las más atractivas vistas a su alrededor y son particularmente buenas con pequeños telescopios, donde los colores son más obvios.

Algunos observadores usan a las estrellas dobles como un objeto de prueba para ver la capacidad de sus telescopios, en cuanto a la resolución angular. Pocos observadores, encuentran a las estrellas dobles interminablemente fascinantes a tal grado que desean hacer contribuciones útiles a la materia. Estas contribuciones, se pueden dar al hacer mediciones de la separación angular (ρ) y la posición angular o ángulo de posición (θ), usando un micrómetro, haciendo fotometría de pares muy separados con una cámara CCD o calculando las órbitas con la ayuda de las posiciones observadas.

Los colores de las estrellas dobles son una de las principales razones por las que se estudian estrellas dobles, siendo otra la observación y caracterización de sus órbitas en el transcurso de los años. Aunque esto último no se consigue de manera inmediata como el

registro de los colores.

Los colores se vuelven más fáciles de ver cuando tenemos una ayuda óptica. Primero, hay más luz incidente y los conos que son pequeños receptores en el ojo, los cuales detectan el color, pueden ser estimulados más fácilmente. Segundo, si el telescopio es deliberadamente desenfocado, los colores de la estrella se vuelven más notorios. La razón de esto parece ser de origen fisiológico. Tercero, los colores de la estrella se vuelven más intensos al ser contrastados con otras estrellas de diferentes tonos (Figura [1]).

El efecto en el contraste, varía con la distancia entre las dos estrellas en un sistema doble, para estrellas de diferente tipo espectral y brillo. Mientras un telescopio pequeño realza los colores en las estrellas dobles, si se usa una gran apertura la percepción del color se hace más difícil (Mullaney 1993). Esto puede ser parcialmente explicado por el hecho de que un telescopio más pequeño produce un disco de difracción mayor y los ojos son más susceptibles al color en objetos extendidos que en fuentes puntuales.



Figura 1: Imagen CCD de Albireo (β Cygni) tomada por Bob Franke. La separación es 34.7". El Norte está arriba y el Este a la izquierda. Bob Franke

La Figura [1], muestra a Albireo¹, un sistema doble dorado y azul en la constelación de Cygnus. Aún se desconoce si Albireo es un sistema ligado gravitacionalmente o simplemente un sistema óptico oportunamente alineado. A una distancia de 380 años luz y con una separación de 35 arcsec, el posible período orbital es de por lo menos 75,000 años. Debido a éste largo período orbital, seguramente llevara muchos años determinar la

¹Adquisición de datos por Bob Franke: de 9/4/2010 a 9/8/2010, Chino Valley, AZ con CCDAutoPilot3 y CCDSOft.

naturaleza de este sistema binario.

En 1976, se descubrió que Albireo-A, coloreado en dorado, era a su vez un sistema doble con una separación de solo 0.4 arcsec. Albireo-B, es una estrella verde-azul de rápida rotación con una temperatura superficial de alrededor de 13,200 K.

El conocimiento de las estrellas dobles es de fundamental importancia para la astrofísica, debido a que estos cuerpos, nos proporcionan un método directo para conocer las masas de las estrellas, parámetro fundamental para comprender la evolución de estos astros. Por otra parte hay que destacar que la observación y el estudio de estos sistemas estelares ofrecen a los astrónomos grandes posibilidades de realizar trabajos de investigación a varios niveles y de este modo colaborar con la astronomía observacional.

Al realizar un estudio acerca de la naturaleza de un sistema doble, se deben aplicar varios criterios, los cuales, no nos aseguran fehacientemente si el par es físico u óptico, pero nos indica la probabilidad de ser de uno u otro tipo de estrellas dobles. La confirmación de que el par sea físico (orbital) surge después de haber encontrado evidencias de un movimiento orbital.

Al revisar, en ésta trabajo el catálogo de estrellas dobles (WDS), nos dimos cuenta que contiene una gran cantidad de estrellas dobles que son ópticas, es decir sin ninguna importancia astrofísica y el hecho de que los astrónomos podamos "filtrar", las estrellas físicas de las ópticas, permite ahorrar una gran cantidad de recursos humanos y técnicos.

Es muy importante medir periódicamente estos sistemas para mantener actualizado el catálogo de Estrellas Dobles, si necesitamos conocer las variaciones en las posiciones relativas de las parejas estelares, es necesario contar con las mediciones astrométricas de distintas épocas con lo que se podrían graficar los desplazamientos relativos.

Incluso en el WDS, nos encontramos con sistemas abandonados y/o perdidos, entendiéndose, como aquellos que llevan muchos años sin medirse, algunos de los cuales no se han vuelto a medir desde su descubrimiento, hace más de 100 años.

Capítulo 1

Clasificación de estrellas binarias

En este capítulo, hablaré de las distintas clasificaciones que existen hoy en día, para los sistemas de estrellas binarias. Es importante señalar que la clasificación, no es exhaustiva, ya que debido a constantes actualizaciones, pueden aparecer nuevas clases y subclases. Sin embargo, mostraré las más representativas, sobre todo porqué son suficientes para el objetivo de la presente tesis.

§1.1. Introducción a las estrellas binarias

Una gran parte de las estrellas que podemos observar en el cielo en una noche despejada, no están aisladas, sino que forman sistemas de dos estrellas, de este hecho proviene el término de estrellas dobles. En realidad, cuando observamos las estrellas a simple vista, las vemos como una sola estrella, pero cuando se las observa a través de telescopios, es posible desdoblarlas en sus componentes. A veces, esta proximidad de las dos estrellas es solamente aparente, es decir que por un efecto de perspectiva, las vemos próximas en el espacio, aunque se encuentran a distintas distancias con respecto a nosotros.

A estos sistemas se les conoce como dobles ópticas. En cambio, otros pares pueden estar muy cercanos entre sí y cabe la posibilidad de que exista alguna relación física entre las estrellas del par, e incluso en algunos casos podemos observar que una de las estrellas se mueve alrededor de la otra respondiendo a las leyes de la Gravitación Universal y de las leyes de Kepler sobre el movimiento orbital. En realidad, ambas estrellas se mueven alrededor del centro común de masa.

Además de los sistemas formados por dos estrellas, encontramos sistemas más complejos formados por tres o más estrellas, llamaos en estos casos sistemas múltiples. La estrella más cercana a nosotros, α Centauro, es un sistema triple cuya tercera componente

es "Próxima Centauri". Un ejemplo de sistema cuádruple lo constituye el "Trapezio", ubicado en la "Espada de Orión".

A menudo, dos estrellas en el cielo parecen estar muy cerca entre sí, aunque en realidad están a muy diferentes distancias de nosotros. Tales estrellas son llamadas estrellas binarias ópticas. Sin embargo, muchos pares, están realmente a la misma distancia y forman un sistema físico, en el cual las dos componentes, están orbitando una alrededor de la otra, en torno al centro de masa común del sistema.

§1.2. Clasificación de estrellas binarias

Los sistemas dobles, en principio se pueden clasificar en dos grupos principales: las dobles ópticas y las dobles físicas. Las dobles ópticas son aquellos sistemas en que la cercanía de las estrellas es una consecuencia de la perspectiva, es decir, las observamos en la misma dirección en el cielo, pero pueden estar a muy distinta distancia con respecto a nosotros y por ende, estos sistemas carecen de toda importancia astrofísica.

Las estrellas dobles físicas, las podemos clasificar en varios tipos, según las técnicas utilizadas para su descubrimiento. Estos tipos son:

1. Dobles Astrométricas.
2. Dobles Fotométricas o Eclipsantes.
3. Dobles Espectroscópicas.
4. Dobles de Ocultación.
5. Binarias Visuales.

§1.3. Estrellas binarias astrométricas

Todas las estrellas poseen un movimiento propio, el cual fue descubierto por el astrónomo Edmund Halley. La técnica que usó, fue la de comparar las posiciones en la esfera celeste¹, de algunas estrellas de su época, con las publicadas varios siglos antes por el astrónomo Hiparco. Si la estrella está aislada en el espacio, su movimiento propio será una línea recta, pero si la estrella tiene una compañera con la que está relacionada físicamente, el movimiento en lugar de ser lineal, presenta un movimiento ondulatorio o sinusoidal; esto se debe a que ambas componentes están vinculadas gravitacionalmente

¹La esfera celeste, es la representación convencional del cielo para un observador ubicado en la Tierra.

y la ubicación del centro de gravedad depende de las masas de las dos estrellas componentes.

El movimiento lineal es el que corresponde al movimiento propio del centro de masa y como cada una de las estrellas se mueven describiendo órbitas alrededor de dicho centro, si combinamos ambos movimientos obtenemos la representación sinusoidal del movimiento propio de la estrella más brillante.

Estas estrellas se les detecta justamente estudiando el movimiento propio de una de las componentes (primaria), mientras que la secundaria no es visible, fundamentalmente por dos razones: primero porque la componente secundaria está muy cerca de la primaria o segundo porque la diferencia de magnitudes es muy grande y por lo tanto el brillo de la primaria domina al de la secundaria, impidiendo que la podamos desdoblar con los medios ópticos.

En las estrellas binarias astrométricas, sólo una de las componentes se observa, pero su movimiento propio variable, muestra que existe una segunda componente. Un ejemplo de este tipo de estrella doble es el caso de la estrella Sirio, en cuya componente principal, se observó un movimiento propio oscilante, cuya explicación fue la presencia de un objeto invisible. Posteriormente fue descubierto visualmente el objeto perturbador, el cual resultó ser una enana blanca. (Figura 1.1).

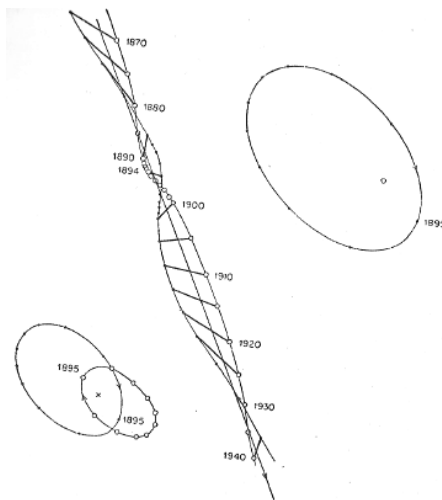


Figura 1.1: Trayectoria oscilante de la estrella Sirio, mostrando esquemáticamente las órbitas de ambas componentes, en torno al centro de gravedad común. La línea recta representa el movimiento propio del centro de masa común, mientras que las curvas representan los movimientos relativos de ambas estrellas en torno al centro de masa. La amplitud de estas curvas, está relacionada con las masas de las dos estrellas.

§1.4. Estrellas Binarias Fotométricas o Eclipsantes

Las binarias eclipsantes o fotométricas se caracterizan por las variaciones luminosas de las estrellas. Estas variaciones son extrínsecas, es decir, son producidas por fenómenos externos a las mismas estrellas.

Si el plano de la órbita está orientado de tal manera que las vemos de canto, una de las estrellas en su movimiento orbital alrededor de la otra produce eclipses, causando un cambio en la magnitud total aparente. El prototipo de estas estrellas es la estrella Algol (β Persei).

Los eclipses que podemos encontrar en este tipo de estrellas son muy similares a los eclipse de Sol que podemos observar desde la Tierra, es decir, estos pueden ser totales, parciales o anulares, según la orientación de la órbita y las dimensiones relativas de cada una de las estrellas que componen al sistema.

El estudio de estos sistemas binarios es de fundamental importancia para la astronomía, ya que por medio de estos, podemos conocer en forma directa las masas de las estrellas y en el caso particular de las estrellas dobles eclipsantes, si conocemos la velocidad orbital, estaremos en condiciones de conocer también las dimensiones relativas de las estrellas; basta para ello determinar los instantes de dos contactos sucesivos²(Figura 1.2).

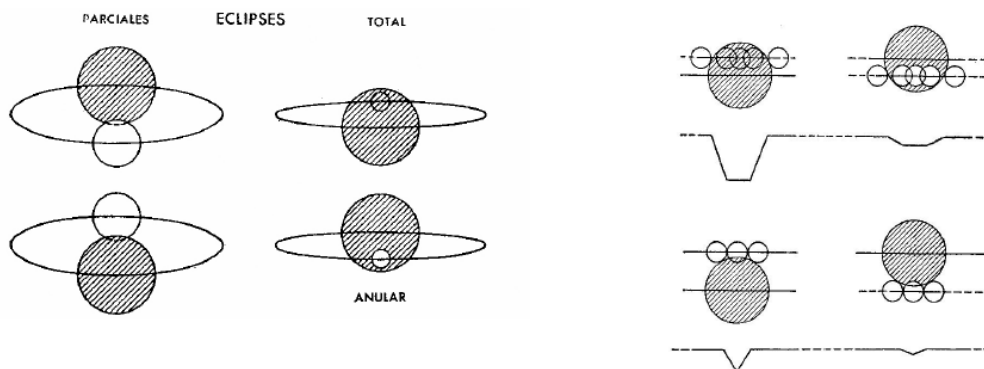


Figura 1.2: Diagrama esquemático, donde se muestra un ejemplo de binarias eclipsantes, mostrando un eclipse total, parcial y anular con su correspondiente curva de luz.

En muchos casos estas estrellas tienen sus superficies casi en contacto por lo cual también las estrellas sufren grandes efectos de marea, que distorsionan a la forma de la

²Se llama contactos a los instantes en que las superficies de ambas estrellas están en contacto, dando inicio a la variación luminosa.

misma. El estudio de estas estrellas corresponde al campo de las estrellas variables, dado que se las estudia a partir de su curva de luz característica.

§1.5. Estrellas Binarias Espectroscópicas

Las estrellas binarias espectroscópicas, son descubiertas sobre la base de su espectro, ya sea que dos conjuntos de líneas espectrales sean vistos o el corrimiento del efecto Doppler de las líneas observadas varíe periódicamente, indicando una compañera invisible. Estas estrellas están muy cerca entre sí.

Viendo su órbita de perfil, en un instante, una de las estrellas se nos acerca y su espectro se desplaza hacia longitudes de onda menores (azul), mientras que en otro instante, la estrella se aleja de nosotros, desplazando su espectro hacia longitudes de onda mayores (rojo), produciendo el efecto Doppler en su espectro electromagnético.

Cuando lo que observamos, es una sola estrella, el efecto que vemos es que las líneas espectrales tienen un movimiento de vaivén, alrededor de una posición media (Figura 1.3).

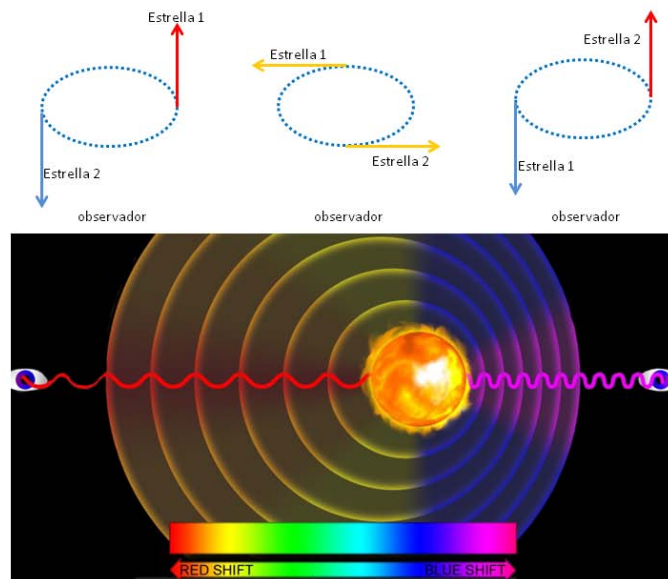


Figura 1.3: Esquema de un sistema binario espectroscópico. La longitud de onda de la luz de la estrella que se aleja del observador se hace más larga; se corre al rojo y la longitud de onda de la luz de la estrella que se acerca al observador se hace más corta; se corre al azul.

§1.6. Estrellas Binarias de Ocultación

Otro tipo de estrellas dobles, en donde no son observables las componentes del par, son las llamadas estrellas dobles de ocultación. Nuestro satélite; la Luna, en su movimiento alrededor de la Tierra, oculta estrellas que encuentra a su paso. Como la Luna carece de atmósfera, la disminución de luminosidad es súbita y si la estrella es doble, tendremos que primero se oculta una de las estrellas y un instante más tarde se oculta la segunda.

Mediante recursos geométricos y determinando los tiempos de la ocultación de las dos estrellas, podemos llegar a la conclusión de que la estrella en cuestión es doble. Este tipo de estrellas dobles está restringido a una estrecha zona. La órbita de la Luna tiene una inclinación de alrededor de 5° con la eclíptica.

Todos los tipos de estrellas binarias hasta aquí considerados, requieren instrumental específico para su observación, son estrellas que están muy juntas, lo que se llaman "pares cercanos" y vistas en el telescopio aparecen como una sola estrella. Sus períodos en años son muy cortos.

A medida que observamos pares más abiertos, también aumenta el período orbital, de acuerdo a la tercera ley de Kepler³. De esta manera, podemos clasificar a las estrellas dobles de acuerdo al período orbital, siendo los de mayores periodos las binarias visuales.

§1.7. Estrellas Binarias Visuales

Las estrellas binarias visuales, son las más fáciles de observar y medir, ya que las dos componentes están lo suficientemente separadas, como para resolverlas con los sistemas ópticos. Estas estrellas, pueden ser vistas como dos componentes separadas, es decir, la separación entre ellas es de mas de $0,1''$ (segundos de arco). La posición relativa de las componentes cambia con el tiempo, conforme se mueven en sus órbitas.

Lo importante del estudio de estos sistemas radica en el hecho que son fuente directa de nuestro conocimiento de las masas estelares, como se puede ver en la siguiente capítulo.

³La tercera ley de Kepler dice que; el cuadrado del período de revolución, es directamente proporcional al cubo de su distancia media.

§1.8. Estrellas Binarias cercanas

En las estrellas binarias cercanas, también conocidas como estrellas binarias de contacto, la separación es de de menos de una unidad astronómica y puede ser comparable al radio de las estrellas.

Los períodos orbitales van de unas horas a unos cuantos años. Las componentes de las estrellas binarias de contacto estan tan cerca que se tocan una a otra através de sus atmósferas. En las estrellas binarias cercanas la separación va de una UA hasta el radio de las estrellas. Algunas de ellas pueden presentar transferencia de masa de acuerdo a su separación.

Capítulo 2

Ecuaciones de Movimiento

§2.1. Ecuaciones de Movimiento para un Sistema Binario

Nos concentraremos en un sistema de sólo dos cuerpos. Es el único caso que tiene una solución analítica. Llamemos a una estrella M_1 y a la otra M_2 . Sean los vectores de posición respectivos \mathbf{r}_1 y \mathbf{r}_2 , en un sistema inercial de coordenadas. La posición relativa estará dada por el vector $\mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$, (Figura. 2.1).

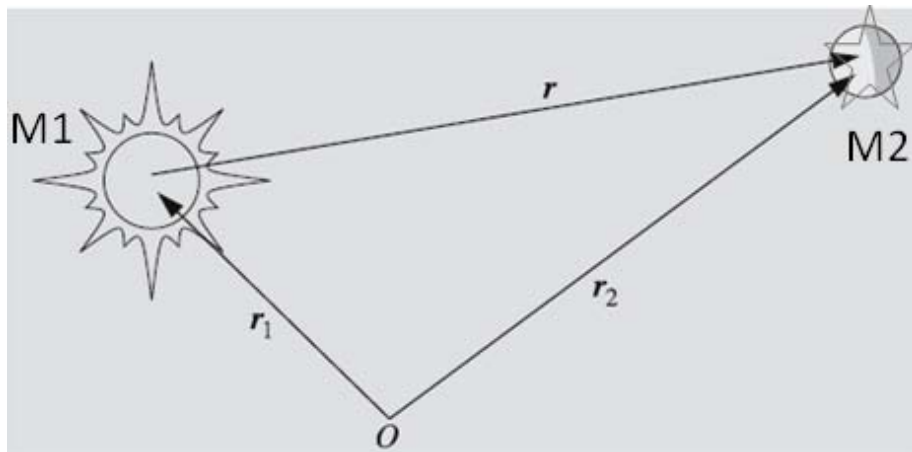


Figura 2.1: Radio vector \mathbf{r} de la estrella M_1 a la estrella M_2 en un marco de referencia inercial arbitrario

De acuerdo a la ley de gravitación universal de Newton la estrella M_1 siente un jalón gravitacional proporcional al producto de las masas M_1 y M_2 e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia r . Ya que la fuerza es dirigida hacia la masa M_1 , la fuerza puede ser expresada de la siguiente manera:

$$\mathbf{F} = \frac{GM_1M_2}{r^2} \frac{-\mathbf{r}}{r} = -GM_1M_2 \frac{\mathbf{r}}{r^3}, \quad (2.1)$$

donde G es la constante gravitacional.

Ahora de acuerdo a la segunda ley de Newton, la aceleración $\ddot{\mathbf{r}}_2$ de la estrella M_2 es proporcional a la fuerza aplicada:

$$\mathbf{F} = M_2\ddot{\mathbf{r}}_2 \quad (2.2)$$

Combinando las ecuaciones (2.1) y (2.2), obtenemos la ecuación de movimiento de la estrella M_2 :

$$M_2\ddot{\mathbf{r}}_2 = -GM_1M_2 \frac{\mathbf{r}}{r^3}. \quad (2.3)$$

Debido a que la estrella M_1 siente el mismo jalón gravitacional, pero en el sentido opuesto, podemos escribir entonces su ecuación de movimiento:

$$M_1\ddot{\mathbf{r}}_2 = +GM_1M_2 \frac{\mathbf{r}}{r^3}. \quad (2.4)$$

Ahora aclaramos que estamos particularmente interesados en el movimiento relativo de la estrella M_2 con respecto a la estrella M_1 . Para encontrar la ecuación de su movimiento relativo, cancelamos las masas repetidas en las ecuaciones (2.3) y (2.4) y restamos la ecuación (2.4) a la ecuación (2.3), obteniendo lo siguiente:

$$\ddot{\mathbf{r}}_2 = -\mu \frac{\mathbf{r}}{r^3}, \quad (2.5)$$

donde hemos definido a μ como:

$$\mu = G(M_1 + M_2). \quad (2.6)$$

§2.2. Solución de la Ecuación de Movimiento

La ecuación de movimiento (2.5), es una ecuación vectorial de segundo orden. Por lo tanto, se necesitan seis constantes de integración para obtener la solución completa.

El momento angular de la estrella M_2 , en el marco de referencia de la estrella M_1 , es:

$$\mathbf{L} = M_2\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}}. \quad (2.7)$$

Si definimos una nueva variable \mathbf{k} , dividiendo la ecuación (2.7) por la masa M_2 :

$$\mathbf{k} = \mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}}. \quad (2.8)$$

Derivando k con respecto al tiempo:

$$\dot{\mathbf{k}} = \mathbf{r} \times \ddot{\mathbf{r}} + \dot{\mathbf{r}} \times \dot{\mathbf{r}}. \quad (2.9)$$

El último término se hace cero por ser vectores paralelos y en el primer término tenemos la aceleración $\ddot{\mathbf{r}}$, la cual está dada por la ecuación de movimiento (2.5), por lo tanto obtenemos:

$$\dot{\mathbf{k}} = \mathbf{r} \times -\mu \frac{\mathbf{r}}{r^3} = -\left(\frac{\mu}{r^3}\right) \mathbf{r} \times \mathbf{r} = 0. \quad (2.10)$$

Del resultado anterior se concluye que el vector \mathbf{k} es un vector constante independiente del tiempo y el movimiento está restringido al plano perpendicular al vector \mathbf{k} , Figura (2.2).

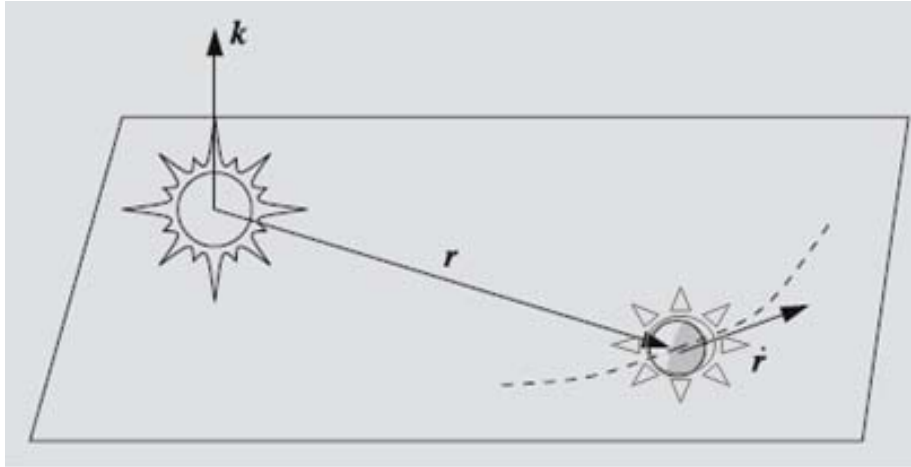


Figura 2.2: El vector momento angular \mathbf{k} es perpendicular al radio vector \mathbf{r} al vector velocidad $\dot{\mathbf{r}}$. Debido a que \mathbf{k} es un vector constante, el movimiento de la estrella M_2 , está restringido al plano perpendicular al vector \mathbf{k} .

Para encontrar otro vector constante, calculamos el producto vectorial $\mathbf{k} \times \ddot{\mathbf{r}}$:

$$\dot{\mathbf{k}} \times \ddot{\mathbf{r}} = (\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}}) \times \left(\frac{-\mu \mathbf{r}}{r^3}\right) = -\frac{\mu}{r^3} [(\mathbf{r} \cdot \mathbf{r})\dot{\mathbf{r}} - (\mathbf{r} \cdot \dot{\mathbf{r}})\mathbf{r}]. \quad (2.11)$$

La derivada temporal de la distancia r es igual a la proyección de $\dot{\mathbf{r}}$ en la dirección de \mathbf{r} . Por lo tanto, usando las propiedades del producto escalar, obtenemos $\dot{r} = \mathbf{r} \cdot \dot{\mathbf{r}}/r$, lo que nos lleva a

$$\mathbf{r} \cdot \dot{\mathbf{r}} = r\dot{r}. \quad (2.12)$$

Por lo tanto

$$\mathbf{k} \times \ddot{\mathbf{r}} = -\mu(\dot{\mathbf{r}}/r - \mathbf{r}\dot{r}/r^2) = \frac{d}{dt}(-\mu\mathbf{r}/r). \quad (2.13)$$

Debido a que \mathbf{k} es constante, el producto vectorial también se puede expresar como:

$$\mathbf{k} \times \ddot{\mathbf{r}} = \frac{d}{dt}(\mathbf{k} \times \dot{\mathbf{r}}). \quad (2.14)$$

Combinando la ecuación (2.14) con la ecuación (2.13), obtenemos:

$$\frac{d}{dt}(\mathbf{k} \times \dot{\mathbf{r}} + \mu\mathbf{r}/r) = 0, \quad (2.15)$$

y por lo tanto

$$\mathbf{k} \times \dot{\mathbf{r}} + \mu\mathbf{r}/r = cte = -\mu\mathbf{e}. \quad (2.16)$$

Ya que \mathbf{k} , es perpendicular al plano orbital, entonces $\mathbf{k} \times \dot{\mathbf{r}}$ debe estar en el mismo plano orbital. Así, \mathbf{e} debe ser una combinación lineal de dos vectores en el plano orbital y así mismo \mathbf{e} también debe estar en plano orbital. Éste vector \mathbf{e} apunta en la dirección en donde la estrella M_2 se encuentra más próxima a la estrella M_1 . Este punto es llamado *periastro*. Figura (2.3).

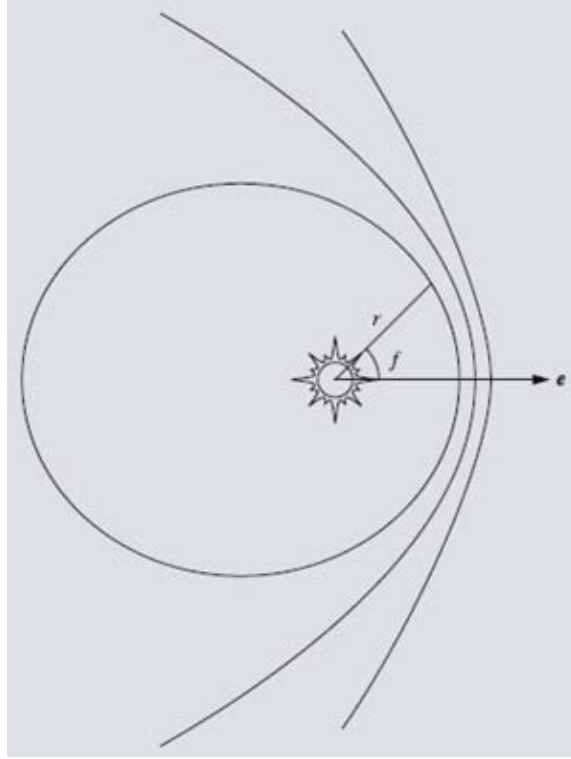


Figura 2.3: La órbita de un objeto en el campo gravitacional de otro, es una sección cónica; elipse, parábola o hipérbola. El vector \mathbf{e} apunta en la dirección del pericentro, donde el objeto está más cerca del objeto central. Si el objeto central es el Sol, esta dirección se le llama perihelio, si es otra estrella periastro, si es la Tierra perigeo. La anomalía verdadera f se mide desde el pericentro.

Una constante más, es encontrada al calcular $\dot{\mathbf{r}} \cdot \ddot{\mathbf{r}}$.

$$\dot{\mathbf{r}} \cdot \ddot{\mathbf{r}} = -\mu \dot{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r} / r^3 = -\mu r \dot{r} / r^3 = -\mu \dot{r} / r^2 = \frac{d}{dt}(\mu / r). \quad (2.17)$$

Por otra parte también tenemos:

$$\dot{\mathbf{r}} \cdot \ddot{\mathbf{r}} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \dot{\mathbf{r}} \cdot \dot{\mathbf{r}} \right), \quad (2.18)$$

por lo tanto se obtiene

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \dot{\mathbf{r}} \cdot \dot{\mathbf{r}} - \frac{\mu}{r} \right) = 0, \quad (2.19)$$

de donde se concluye que la cantidad encerrada en el apéndice es una constante con respecto al tiempo, por lo tanto tenemos la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{2} v^2 - \mu / r = cte = h. \quad (2.20)$$

Aquí, v es la rapidez relativa de la estrella M_2 con respecto a la estrella M_1 . La constante h se llama *integral de energía*. La energía total de la estrella M_2 es M_2h .

Se debe puntualizar que la energía y el momento angular dependen del marco de referencia usado. Aquí, se ha usado el marco de referencia de la estrella M_1 , la cual está de hecho acelerada, como todos los objetos en el Universo.

Hasta ahora, se han encontrado dos vectores constantes y un escalar constante. De estas cantidades encontradas, no todas son independientes, específicamente, se tienen las siguientes dos relaciones:

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{e} = 0, \quad (2.21)$$

$$\mu^2(e^2 - 1) = 2hk^2, \quad (2.22)$$

donde e y k son las magnitudes de los vectores \mathbf{e} y \mathbf{k} . La primera ecuación es directa de las definiciones de e y k , ya que como se vió anteriormente, son perpendiculares. Ahora para verificar la ecuación (2.22), elevamos al cuadrado ambos lados de la ecuación (2.16):

$$\mu^2 e^2 = (\mathbf{k} \times \dot{\mathbf{r}}) \cdot (\mathbf{k} \times \dot{\mathbf{r}}) + \mu^2 \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}}{r^2} + 2(\mathbf{k} \times \dot{\mathbf{r}}) \cdot \frac{\mu \mathbf{r}}{r}. \quad (2.23)$$

Como consecuencia de que \mathbf{k} es perpendicular a $\dot{\mathbf{r}}$, la magnitud de $\mathbf{k} \times \dot{\mathbf{r}}$ es $|\mathbf{k}||\dot{\mathbf{r}}| = kv$ y $(\mathbf{k} \times \dot{\mathbf{r}}) \cdot (\mathbf{k} \times \dot{\mathbf{r}}) = k^2v^2$. por lo tanto se obtiene la siguiente ecuación:

$$\mu^2 e^2 = k^2v^2 + \mu^2 + \frac{2\mu}{r}(\mathbf{k} \times \dot{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}). \quad (2.24)$$

El último término contiene un triple producto escalar, en donde podemos intercambiar el producto punto y el producto cruz, para obtener $\mathbf{k} \cdot \dot{\mathbf{r}} \times \mathbf{r}$. Enseguida invertimos el orden de los dos últimos factores y debido a que el producto cruz no es conmutativo el signo del producto lo invertimos:

$$\begin{aligned} \mu^2(e^2 - 1) &= k^2v^2 - \frac{2\mu}{r}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}}) \\ &= k^2v^2 - \frac{2\mu}{r}k^2 \\ &= 2k^2 \left(\frac{1}{2}v^2 - \frac{\mu}{r} \right) \\ &= 2k^2h. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Por lo tanto ha quedado deducida la ecuación (2.22). Las ecuaciones (2.21) y (2.22), reducen el número de variables independientes a dos, pero

se necesita una más. Las constantes que tenemos hasta el momento, describen el tamaño, la forma y orientación de la órbita, pero no conocemos aún la posición de M_2 en un tiempo dado $t = t_0$ o alternativamente el tiempo τ , en el que M_2 se encuentra en la posición del *periastro*.

§2.3. Ecuación de la Órbita y La Primera Ley de Kepler

Para encontrar la forma geométrica de la órbita, vamos a derivar su ecuación. Debido a que \mathbf{e} es un vector constante en el plano orbital, lo tomamos como dirección de referencia. Denotamos el ángulo entre el radio vector \mathbf{r} y \mathbf{e} por f . Al ángulo f se le llama *anomalía verdadera*.

Usando las propiedades del producto escalar obtenemos:

$$\mathbf{r} \cdot \mathbf{e} = re \cos f. \quad (2.26)$$

Pero el producto $\mathbf{r} \cdot \mathbf{e}$, también puede ser evaluado usando la definición de \mathbf{e} :

$$\begin{aligned} \mathbf{r} \cdot \mathbf{e} &= -\frac{1}{\mu}(\mathbf{r} \cdot \mathbf{k} \times \dot{\mathbf{r}} + \mu \mathbf{r} \cdot \mathbf{r}/r) \\ &= -\frac{1}{\mu}(\mathbf{k} \cdot \dot{\mathbf{r}} \times \mathbf{r} + \mu r) \\ &= -\frac{1}{\mu}(-k^2 + \mu r) \\ &= \frac{k^2}{\mu} - r \end{aligned} \quad (2.27)$$

Igualando las dos expresiones de $\mathbf{r} \cdot \mathbf{e}$, obtenemos:

$$r = \frac{k^2/\mu}{1 + e \cos f}. \quad (2.28)$$

La ecuación anterior es la forma general de una sección cónica en coordenadas polares. La magnitud de e da la excentricidad de la cónica:

$$\begin{aligned} e = 0 & \quad \text{circulo,} \\ 0 < e < 1 & \quad \text{elipse,} \\ e = 1 & \quad \text{parabola,} \\ e > 1 & \quad \text{hiperbola.} \end{aligned}$$

Analizando (2.28), se encuentra que r alcanza su mínimo cuando $f = 0$, es decir cuando se encuentra en la dirección del vector \mathbf{e} . Por lo tanto, \mathbf{e} , apunta en la dirección del periastro.

§2.4. Elementos Orbitales

Hemos derivado hasta ahora un conjunto de constantes para el estudio de la dinámica del movimiento orbital. Veamos ahora otra colección de constantes más apropiadas para describir la geometría de la órbita. Las siguientes seis cantidades son llamadas los elementos orbitales. Figura (2.4):

a : semieje mayor,

e : excentricidad,

i : inclinación,

Ω : longitud del nodo ascendente,

ω : argumento del periastro,

τ : tiempo del periastro.

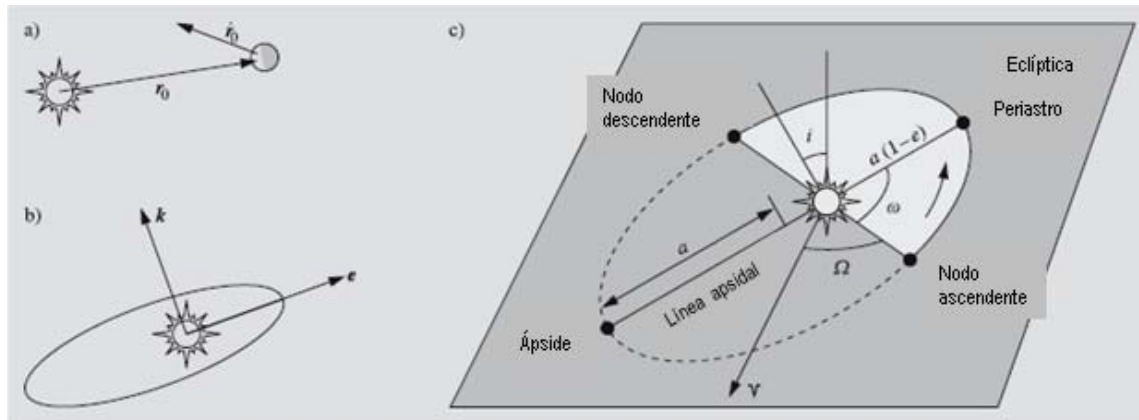


Figura 2.4: Se necesitan seis constantes de integración para describir la órbita de la estrella M_2 . Estas constantes pueden ser elegidas de varias formas. (a). Si la órbita es calculada numéricamente, la elección más simple es usar los valores iniciales del radio vector y el vector velocidad. (b). Otra posibilidad es usar el momento angular (\mathbf{k}), la dirección del periastro (\mathbf{e}), que da la excentricidad y el tiempo del periastro (τ). (c). El tercer método que mejor describe la geometría de la órbita, consiste en tomar las constantes del nodo ascendente Ω , el ángulo del periastro ω , la inclinación de la órbita i , el semieje mayor a , la excentricidad e y el tiempo del periastro τ .

El vector excentricidad se obtiene como la magnitud del vector \mathbf{e} . De la ecuación de la órbita (2.28), vemos que el parámetro de la órbita es $p = k^2/\mu$. El parámetro de una

sección cónica es siempre $a|1 - e^2|$, lo cual da el semieje mayor si e y k son conocidas:

$$a = \frac{k^2/\mu}{|1 - e^2|}. \quad (2.29)$$

Al aplicar la ecuación (2.22), se obtiene el tamaño de la órbita y la integral de energía h :

$$a = \begin{cases} -\mu/2h & \text{si la órbita es una elipse} \\ \mu/2h & \text{si la órbita es una hipérbola.} \end{cases} \quad (2.30)$$

Para un sistema ligado, como en la órbita elíptica, la energía total y la integral de energía h son negativas. Para una órbita hiperbólica h es positiva; la energía cinética es tan alta que la partícula puede escapar del sistema.

La orientación de la órbita está determinada por las direcciones de \mathbf{k} y \mathbf{e} . Los tres ángulos i , Ω y ω contienen la misma información.

La inclinación i da la oblicuidad del plano orbital, relativo a algún plano de referencia fijado. Para cuerpos en el sistema solar, el plano de referencia es la eclíptica. Para objetos que se mueven en sentido contrario a las manecillas del reloj, la inclinación está en el intervalo $[0^\circ, 90^\circ]$. Para orbitas retrogradadas, en sentido de las manecillas del reloj, la inclinación está en el rango de $(90^\circ, 180^\circ]$. Por ejemplo, la inclinación del cometa Halley es de 162° , lo que significa que el movimiento es retrogrado y el ángulo entre su plano orbital y la eclíptica es de $180^\circ - 162^\circ = 18^\circ$.

La longitud del nodo ascendente Ω , indica en donde cruza el objeto la eclíptica de sur a norte. Es medido en sentido contrario a las manecillas del reloj del equinoccio vernal. Los elementos orbitales i y Ω , juntos determinan la orientación del plano orbital y corresponden a la dirección de \mathbf{k} .

El argumento del periastro ω da la dirección del periastro, medido desde el nodo ascendente, en la dirección del movimiento. La misma información está contenida en la dirección de \mathbf{e} .

§2.5. Segunda y Tercera ley de Kepler

Si tomamos como referencia al sistema solar, el radio vector de un planeta en coordenadas polares es simplemente:

$$\mathbf{r} = r\hat{\mathbf{e}}_r, \quad (2.31)$$

donde $\hat{\mathbf{e}}_r$ es un vector unitario paralelo a \mathbf{r} , Figura (2.5). Si el planeta se mueve con velocidad angular f , la dirección de este vector unitario cambia de igual forma:

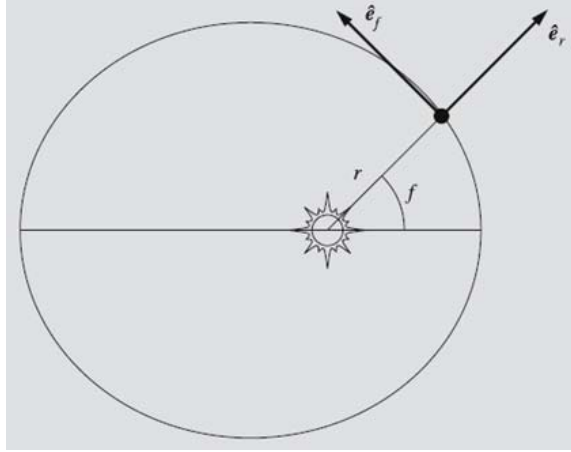


Figura 2.5: Vectores unitarios $\hat{\mathbf{e}}_r = \hat{\mathbf{e}}_f$ del sistema de coordenadas polares. Las direcciones de estos vectores cambian mientras el planeta o estrella se mueve a lo largo de su órbita.

$$\dot{\hat{\mathbf{e}}}_r = f\hat{\mathbf{e}}_f, \quad (2.32)$$

donde $\hat{\mathbf{e}}_f$ es un vector unitario perpendicular a $\hat{\mathbf{e}}_r$. La velocidad del planeta se encuentra al tomar la derivada temporal de (2.31):

$$\dot{\mathbf{r}} = \dot{r}\hat{\mathbf{e}}_r + r\dot{\hat{\mathbf{e}}}_r = \dot{r}\hat{\mathbf{e}}_r + rf\hat{\mathbf{e}}_f. \quad (2.33)$$

El momento angular \mathbf{k} puede ser evaluado ahora usando (2.31) y (2.33):

$$\mathbf{k} = \mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}} = r^2\dot{f}\hat{\mathbf{e}}_z, \quad (2.34)$$

donde $\hat{\mathbf{e}}_z$ es un vector perpendicular al plano orbital. La magnitud de \mathbf{k} es

$$k = r^2\dot{f}. \quad (2.35)$$

La velocidad de área del planeta, indica el área barrida por el radio vector por unidad de tiempo. Esto es la derivada del área; $\dot{\mathbf{A}}$. En términos de la distancia r y la anomalía f , la velocidad de área es

$$\dot{\mathbf{A}} = \frac{1}{2}r^2\dot{f}. \quad (2.36)$$

Al comparar con la ecuación (2.35), encontramos que

$$\dot{A} = \frac{1}{2}k, \quad (2.37)$$

lo que nos indica que la constante k , es la velocidad de área. Por lo tanto tenemos la segunda ley de Kepler:

El radio vector del planeta barre áreas iguales en tiempos iguales.

Debido a que la distancia entre los dos objetos varía, entonces la velocidad también varía. Por lo tanto la ecuación (2.37), la podemos escribir en la forma siguiente:

$$dA = \frac{1}{2}kdt, \quad (2.38)$$

e integrando sobre el período completo:

$$\int_{elipse} dA = \frac{1}{2}k \int_0^P dt, \quad (2.39)$$

donde P es el período orbital. El área de la elipse es:

$$\pi ab = \pi a^2 \sqrt{1 - e^2}, \quad (2.40)$$

donde a y b , son los semiejes mayor y menor respectivamente y e es la excentricidad. Por lo tanto:

$$\pi a^2 \sqrt{1 - e^2} = \frac{1}{2}kP. \quad (2.41)$$

Para encontrar la magnitud de k , sustituimos la integral de energía h como función del eje semimayor. Sustituimos la ecuación (2.30) en la ecuación (2.22) y obtenemos:

$$k = \sqrt{G(M_1 + M_2)a(1 - e^2)}. \quad (2.42)$$

Ahora sustituimos la ecuación (2.42) en la ecuación (2.41), con lo que obtenemos la siguiente expresión:

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{G(M_1 + M_2)} a^3. \quad (2.43)$$

Esta es la tercera ley de Kepler, derivada de la ley de Newton. La versión original dice que:

El cociente de los cubos de los ejes semimayores de las órbitas de dos planetas es igual al cociente de los cuadrados de sus períodos orbitales.

En nuestro caso estamos usando estrellas M_1 y M_2 en vez de planetas.

Está ecuación se puede simplificar si expresamos las distancias en unidades astronómicas (UA), el tiempo en aos siderales y las masas en masas solares (M_\odot). Entonces $G = 4\pi^2$ y

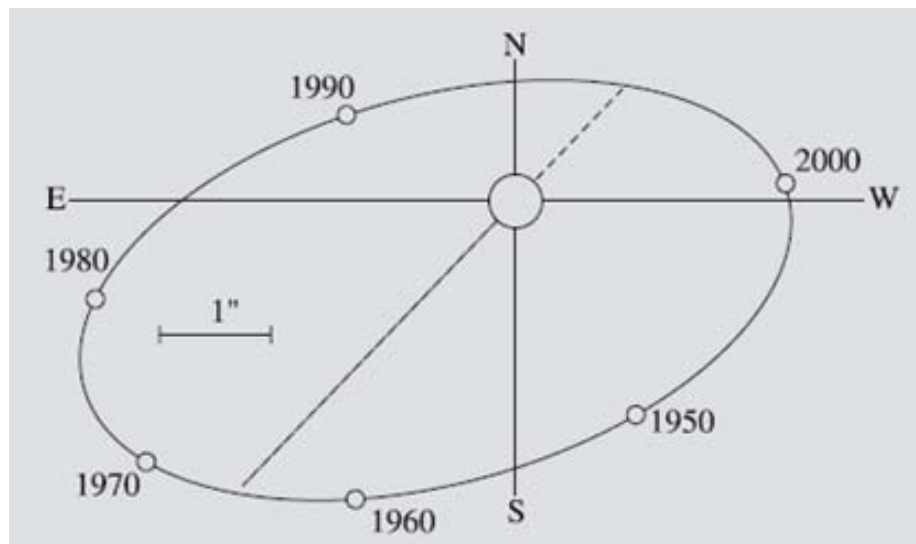
$$\mathbf{a}^3 = (\mathbf{M}_1 + \mathbf{M}_2)\mathbf{P}^2. \quad (2.44)$$

Capítulo 3

Ecuaciones de movimiento de estrellas binarias

§3.1. Ecuaciones de movimiento de estrellas binarias visuales

En las estrellas binarias, consideramos que la componente primaria á más brillante es estacionaria y la componente secundaria más débil está orbitando alrededor de esta. La separació angular de las estrellas ρ y la dirección angular a la componente secundaria pueden ser directamente observadas. Haciendo uso de observaciones hechas por varios años o décadas, la órbita relativa de la estrella secundaria puede ser determinada. La primer órbita de un sistema binario fué la de ξUMa en 1830, Figura (3.1)



9,2.png

Figura 3.1: En 1830 la órbita de ξ Ursae Majoris fué la primer órbita determinada observacionalmente.

Las observaciones de sistemas binarios visuales solo dan la proyección de la elipse orbital relativa en el plano del cielo. La forma y posición de la verdadera órbita no son conocidas. Sin embargo, pueden ser calculadas si hacemos uso del hecho de que la primaria debe estar localizada en el foco de la órbita relativa. La desviación del foco de la posición proyectada de la órbita relativa de la estrella primaria, nos permite determinar la posición de la verdadera órbita.

El tamaño absoluto de la órbita puede ser encontrada si la distancia de la binaria es conocida. Sabiendo esto, la masa total del sistema puede ser calculada de la tercera ley de Kepler; Ecuación (2.44).

Las masas de las componentes individuales pueden ser determinadas al observar los movimientos de ambas componentes relativos al centro de masa, Figura (3.2).

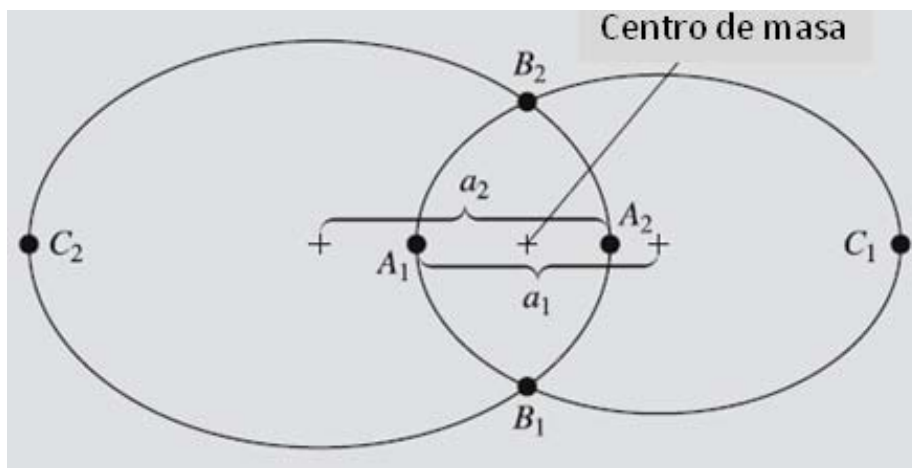


Figura 3.2: Las componentes de un sistema binario se mueven alrededor del centro de masa común. A_1 y A_2 denotan las posiciones de las estrellas en los instantes A, B y C.

Hagamos que los ejes semimayores de las elipses orbitales de las componentes primaria y secundaria sean a_1 y a_2 . Entonces de acuerdo a la definición de centro de masa,

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{M_2}{M_1}, \quad (3.1)$$

donde M_1 y M_2 son las masas de las componentes. El eje semimayor de la órbita relativa es

$$a = a_1 + a_2. \quad (3.2)$$

§3.2. Estrellas binarias astrométricas

En las estrellas binarias astrométricas, sólo la órbita de la componente más brillante alrededor del centro de masa puede ser observada. Si la masa de la componente visible se estima, de su luminosidad, la masa de la compañera invisible también puede ser estimada.

La primer estrella binaria astrométrica fué Sirio. En 1830 se observó que tenía un movimiento propio ondulatorio. La compañera fué Sirio B, lacula fué un nuevo tipo de objeto; una enana blanca. Figura (3.3).

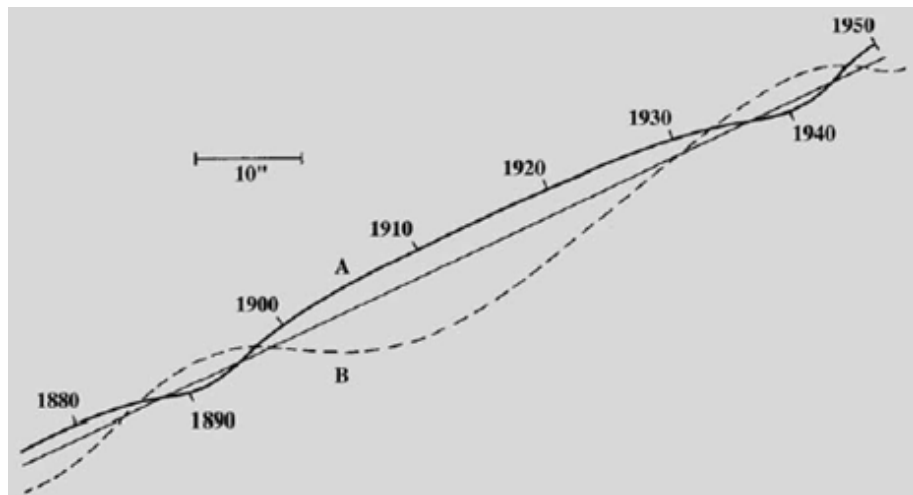


Figura 3.3: Las trayectorias aparentes en el cielo de Sirio A y su compañera Sirio B.

Los movimientos propios de estrellas cercanas han sido cuidadosamente estudiados en la búsqueda de sistemas planetarios.

§3.3. Estrellas Binarias Espectroscópicas

Las estrellas binarias espectroscópicas aparecen como estrellas individuales aún en los telescopios más poderosos, pero su espectro muestra una variación regular. El primer sistema espectroscópico binario fué descubierto en 1880 cuando se encontró que las líneas espectrales de ζ UMa o *Mizar*, se desdoblaron en dos, en intervalos regulares. Figura (3.4).

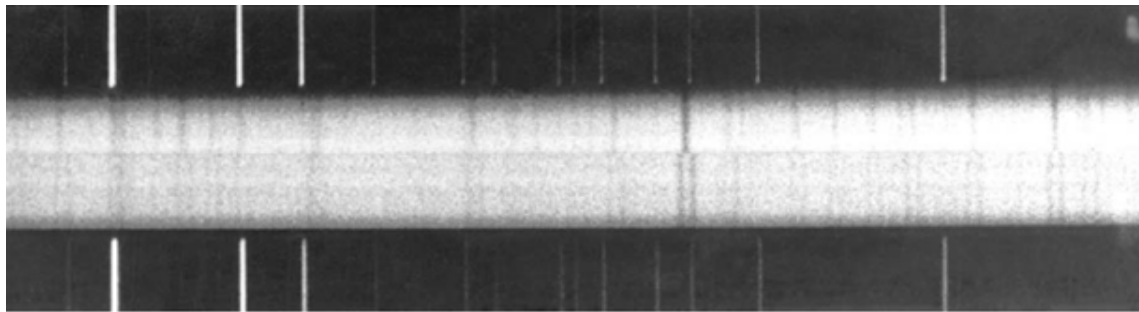


Figura 3.4: Espectro del sistema binario espectroscópico κ Arietis. En el espectro de arriba las líneas son individuales, mientras que en el de abajo las líneas son dobles. Observatorio Lick.

El corrimiento Doppler de una línea espectral es directamente proporcional a la velocidad radial. De esta manera, la separación de las líneas espectrales es la más grande, cuando una componente se está aproximando directamente y la otra está retrocediendo del observador.

El período de la variación es el período orbital de las estrellas. Desafortunadamente, no hay forma general de determinar la posición de la órbita en el espacio.

La velocidad observada v está relacionada con la velocidad verdadera v_0 de acuerdo a

$$v = v_0 \sen i, \quad (3.3)$$

donde la inclinación i , es el ángulo entre la línea de visión y la normal del plano orbital.

Consideremos un sistema binario donde las componentes se mueven en órbitas circulares alrededor del centro de masa. Las órbitas de las componentes las identificamos con a_1 y a_2 . De la definición de centro de masa $M_1 a_1 = M_2 a_2$ y escribiendo $a = a_1 + a_2$, se obtiene

$$a_1 = \frac{a M_2}{M_1 + M_2}. \quad (3.4)$$

La velocidad orbital verdadera es

$$v_{0,1} = \frac{2\pi a_1}{P}, \quad (3.5)$$

donde P es el período orbital. La velocidad orbital observada de acuerdo a la ecuación (3.3) es

$$v_1 = \frac{2\pi a_1 \sen i}{P}. \quad (3.6)$$

Al sustituir la ecuación (3.4) en (3.6), obtenemos

$$v_1 = \frac{2\pi a}{P} \frac{M_2 \operatorname{sen} i}{M_1 + M_2}. \quad (3.7)$$

Resolviendo para a y sustituyendo en la tercera ley de Kepler, obtenemos la *ecuación de función de masa*:

$$\frac{M_2^3 \operatorname{sen}^3 i}{(M_1 + M_2)^2} = \frac{v_1^3 P}{2\pi G}. \quad (3.8)$$

Si una componente en un sistema espectroscópico es tan débil que sus líneas espectrales no pueden ser observadas, entonces solamente el período P y v_1 son observados. La ecuación (3.8) da el valor de la función de masa, la cual es la expresión del lado izquierdo de la ecuación. No se puede determinar la masa total ni las masas individuales de las componentes. Si las líneas espectrales de las componentes pueden ser observadas, v_2 también se conoce. Entonces la ecuación (3.6) nos da

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{a_1}{a_2}, \quad (3.9)$$

y de la definición de centro de masa

$$M_1 = \frac{M_2 v_2}{v_1}. \quad (3.10)$$

Cuando sustituimos esto en la ecuación (3.8), el valor de $M_2 \operatorname{sen}^3 i$ y correspondientemente el valor de $M_1 \operatorname{sen}^3 i$, pueden ser determinados. Sin embargo, las masas no pueden ser encontradas sin conocer el valor de la inclinación i .

§3.4. La separación angular y el paralaje en la ecuación de movimiento

Sabemos que la distancia en unidades astronómicas es proporcional a la separación angular ρ e inversamente proporcional a la paralaje Π , es decir

$$a = \frac{\rho}{\Pi}. \quad (3.11)$$

Reemplazando esto en la ecuación (3.7), obtenemos:

$$v_1 = \frac{2\pi \rho}{P \Pi} \frac{M_2 \operatorname{sen} i}{M_1 + M_2}, \quad (3.12)$$

lo que nos lleva a la siguiente expresión:

$$\frac{\rho}{\Pi} = \left(\frac{M_1 + M_2}{M_2} \right) \left(\frac{P}{2\pi \operatorname{sen} i} \right) v_1 \quad (3.13)$$

La suma de las masas de un sistema binario está dado por la ecuación (2.44) que se deduce de la tercera ley de Kepler y de la ley de la gravitación Universal de Newton:

$$M_1 + M_2 = \frac{a^3}{P^2}, \quad (3.14)$$

donde M_1 y M_2 son las masas de las dos estrellas, a es la separación de ambas estrellas expresada en unidades astronómicas¹ y P , es el período orbital de la doble expresado en años. Las sumas de las masas están dadas en términos de la masa solar M_\odot . El período orbital proviene directamente de las observaciones, la distancia entre las componente del sistema se mide en segundos de arco que debemos convertir en UA.

Por otra parte sustituyendo la distancia a en (3.14) obtenemos

$$M_1 + M_2 = \frac{\rho^3}{\Pi^3 P^2} \quad (3.15)$$

De esta manera determinamos la suma de las masas de las componentes en términos de la masa solar. Para determinar las masas individuales de las estrellas, debemos conocer, no la órbita de una de ellas en torno a la otra estrella, sino el movimiento de cada estrella alrededor del centro de masa del sistema. Sabemos, de la mecánica de Newton, que cuanto más masiva es una estrella, tanto más cercana al centro de gravedad está. Ésto lo podemos expresar diciendo, que la razón de las masas es inversamente proporcional a la razón de sus separaciones:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (3.16)$$

Después de muchos años de observar y medir a las estrellas dobles, se ha podido establecer una relación fundamental para la astrofísica y es una relación entre la luminosidad y las masas de las estrellas conocida como *relación masa-luminosidad*, que nos permite conocer las masas estelares en aquellas estrellas que no forman parte de sistemas dobles.

Esta relación, se cumple para estrellas normales o de la secuencia principal. Esta relación establece que la luminosidad de una estrella es aproximadamente proporcional al cubo de su masa, es decir $L \propto M^3$.

¹La Unidad Astronómica, es la distancia media de la Tierra al Sol y equivale a 150,000,000 Km.

Capítulo 4

Interferometría de motas

En este capítulo haremos una revisión de algunas definiciones astronómicas que nos permitan abordar el concepto de la interferometría de motas. La técnica de interferometría de motas es una de las herramientas fundamentales, que se usarán para desarrollar este trabajo de tesis. Es por ello que es de suma importancia su revisión, a lo largo del presente capítulo.

§4.1. Seeing astronómico

Uno de los factores que afectan significativamente a la calidad de nuestras fotografías astronómicas es la turbulencia atmosférica ("seeing"). La atmósfera se comporta, para efectos de la calidad de la visión, como una lente compuesta por capas de distintas temperaturas y por tanto de distintas densidades e índices de refracción y además de forma continuamente variable. Por si esto fuera poco, las nieblas, brumas, partículas en suspensión y humedad afectan a la calidad de esta "macro lente" por la que tiene que atravesar la luz de las estrellas hasta llegar a nuestro sistema óptico.

El *seeing*¹ astronómico, se refiere a la distorsión y cintilación o centelleo de la luz, de objetos astronómicos, tales como estrellas, causadas por la mezcla turbulenta de la atmósfera de la Tierra, variando la óptica del índice de refracción. Las condiciones del *seeing* astronómico en una noche cualquiera, describe la cantidad que la atmósfera terrestre perturba las imágenes de las estrellas vistas a través de un telescopio.

La medición más común del *seeing* es el diámetro, técnicamente el ancho total a la mitad de la máxima altura o FWHM (del inglés Full Width at Half Maximum) de la

¹Es un vocablo en el idioma inglés, que no tiene una traducción apropiada en español. Se ha adoptado para algunas disciplinas técnicas y científicas, haciendo referencia a algo que se puede ver.

imágen de un objeto puntual visto a través de la atmósfera.

El diámetro de la función de dispersión de punto (diámetro del disco de *seeing*) es una referencia a la mejor resolución angular posible que se puede lograr con un telescopio óptico en una exposición fotográfica larga.

La resolución está relacionada con el diámetro de la mancha difusa, que se ve cuando se observa una estrella puntual a través de la atmósfera. El tamaño del disco de *seeing*, está determinado por las condiciones del *seeing* astronómico, en el momento de la observación.

En las mejores condiciones el *seeing* es de aproximadamente 0.4" (segundos de arco), las cuales se encuentran en los observatorios de alta montaña en islas pequeñas, como Mauna Kea, Hawái, Estados Unidos o La Palma, Tenerife, España.

En el Observatorio Astronómico Nacional (OAN), de la UNAM, en Ensenada, Baja California, México, se ha alcanzado un *seeing* de hasta 0.39" (segundos de arco) de acuerdo a Michel, R., et al. (2003) [7].

El *seeing*, es uno de los mayores problemas para la astronomía desde la Tierra (Orlov et al. 2007) [12]. Mientras que los grandes telescopios tienen teóricamente una resolución de milisegundos de arco, la imágen real nunca es mejor que el *seeing* medido durante la observación. Ésto puede significar fácilmente un factor de 100 entre la resolución teórica y la práctica.

A partir de la década de 1990 se implementaron técnicas de óptica adaptativa que pueden ayudar a corregir estos efectos, mejorando notablemente la resolución de los telescopios terrestres.

El *seeing* astronómico, tiene varios efectos:

1. Hace que las imágenes de las fuentes puntuales tales como estrellas, que en ausencia de la turbulencia atmosférica serían patrones estables de Airy producidos por la difracción, se dividan en los patrones de motas, que cambian muy rápidamente con el tiempo (las imágenes de motas resultantes, pueden ser procesadas con el uso de formación de imágenes de motas).
2. Las imágenes de larga exposición de estos patrones de motas cambiantes, producen

como resultado una imagen borrosa de la fuente puntual, llamado *seeing disc*, palabras tomadas del idioma inglés.

3. El brillo de las estrellas parece fluctuar en un proceso conocido como de centelleo o cintilación.
4. El *seeing* astronómico provoca que las franjas en un interferómetro astronómico se muevan rápidamente.
5. La distribución del *seeing* astronómico a través de la atmósfera, hace que la calidad de la imagen en sistemas de óptica adaptativa se degrade más que si se mira desde fuera de la atmósfera.

Hay tres condiciones comunes de observación astronómica en un observatorio. Estas se describen a continuación.

§4.2. El ancho total a media altura (FWHM) del *seeing disc*

Sin una atmósfera, una estrella tendría un tamaño aparente, un "disco de Airy", determinado por la difracción y sería inversamente proporcional al diámetro del telescopio. Sin embargo, cuando la luz entra en la atmósfera de la Tierra, las diferentes capas de temperatura y diferentes velocidades del viento distorsionan las ondas de luz, que producen distorsiones en la imagen. Los efectos de la atmósfera se pueden modelar como si ésta estuviera formada por celdas de aire en movimiento turbulento rotativo.

En la mayoría de los observatorios, la turbulencia es sólo significativa a escalas más grandes que r_0 (Sección §4.3) y esto limita la resolución de los telescopios. En estas condiciones, la resolución es semejante a la obtenida por un telescopio espacial de 10-20 cm.

La distorsión cambia a una velocidad alta, típicamente a una frecuencia mayor de 100 veces por segundo. En una imagen astronómica típica de una estrella, con un tiempo de exposición de segundos o incluso minutos, las diferentes distorsiones se promedian como un disco lleno, llamada la función de dispersión de punto o *seeing disc*.

El diámetro de este disco, muy a menudo definido como el ancho total a media altura (FWHM), es una medida de las condiciones de observación astronómicas. Se desprende de esta definición, que el *seeing* es siempre una cantidad variable, diferente de un lugar a otro, de noche a noche e incluso variable en una escala de minutos. Los astrónomos suelen hablar de *buenas noches* con un promedio bajo del diámetro del *seeing disc* y de *noches malas* donde el diámetro del *seeing disc* es tan alto que las observaciones no tienen ningún

valor de acuerdo al tipo de observación que realicen.

El FWHM del *seeing disc* (o simplemente *seeing*), se mide en segundos de arco, abreviado con el símbolo ("). Un *seeing* de 1.0" es una buena medida promedio para los sitios astronómicos. Noches de buen *seeing* tienden a ser claras, frías y sin rachas de viento. El aire caliente que asciende (convección), degrada al *seeing*, como lo hace el viento y las nubes.

En los mejores observatorios, en las cimas de las montañas de gran altitud, el viento transporta aire estable que no ha estado previamente en contacto con el suelo, a veces ofreciendo un *seeing* tan bueno como 0.4 ".

§4.3. r_0 y t_0

Las condiciones de observación astronómica en un observatorio pueden ser bien descritas por los parámetros r_0 y t_0 . Para telescopios con diámetros menores que r_0 , la resolución de las imágenes de larga exposición se determina principalmente por la difracción y el tamaño del patrón de Airy y por lo tanto es inversamente proporcional al diámetro del telescopio.

Para telescopios con diámetros mayores que r_0 , la resolución de la imagen está determinada principalmente por la atmósfera y es independiente del diámetro del telescopio, que permanece constante en el valor dado por un telescopio de diámetro igual a r_0 .

El parámetro r_0 , corresponde también a la escala de longitud, en la que la turbulencia se convierte en significativa (10-20 cm en longitudes de onda visibles en buenos observatorios) y t_0 corresponde a la escala de tiempo, en la que los cambios en la turbulencia se vuelven significativos.

r_0 determina el espaciamiento de los actuadores necesarios en una óptica activa del sistema y t_0 determina la velocidad de la corrección necesaria para compensar los efectos de la atmósfera. r_0 y t_0 varían con la longitud de onda utilizada para la obtención de imágenes astronómicas, lo que permite la formación de imágenes de más alta resolución en longitudes de ondas más largas con grandes telescopios. r_0 es a menudo conocido como el parámetro de Fried.

§4.4. Descripción matemática de r_0 y t_0

El patrón de manchas o motas en las imágenes cambia muy rápidamente, por lo que las fotografías de larga exposición muestran una gran burbuja borrosa. El diámetro (FWHM) de la mancha borrosa, en imágenes de larga exposición se llama el diámetro del disco de *seeing* y es independiente del diámetro de telescopio utilizado siempre y cuando no se aplique la corrección de óptica adaptativa.

En la teoría clásica estándar, la luz es tratado como una oscilación en un campo ψ . Para ondas planas monocromáticas que llegan de una fuente puntual distante con vector de onda \mathbf{k} :

$$\psi_0(\mathbf{r}, t) = A_u e^{i(\phi_u + 2\pi\nu t + \mathbf{k}\cdot\mathbf{r})}, \quad (4.1)$$

donde ψ_0 , es el campo complejo en la posición \mathbf{r} y en el tiempo \mathbf{t} , con partes reales e imaginarias correspondientes a las componentes de los campos eléctricos y magnéticos. ϕ_u representa un desplazamiento de fase, ν es la frecuencia de luz determinada por $\nu = c|\mathbf{k}|/(2\pi)$ y A_u es la amplitud.

El flujo de fotones en este caso es proporcional al cuadrado de la amplitud A_u , y la fase óptica se corresponde con el argumento complejo de ψ_0 . Conforme los frentes de onda pasan a través de la atmósfera de la Tierra pueden ser perturbados por las variaciones del índice de refracción en la atmósfera.

El diagrama en la Figura (4.1), muestra esquemáticamente una capa turbulenta en la atmósfera de la Tierra perturbando frentes de onda planos antes de entrar en un telescopio. El frente de onda perturbado ψ_p puede estar relacionado en un momento dado con el frente de onda plano original $\psi_0(\mathbf{r})$, de la siguiente manera:

$$\psi_p = \left(\chi_a(\mathbf{r}) e^{i\phi_a(\mathbf{r})} \right) \psi_0(\mathbf{r}), \quad (4.2)$$

donde $\chi_a(\mathbf{r})$ representa el cambio fraccional en la amplitud del frente de onda y $\phi_a(\mathbf{r})$ es el cambio en la fase del frente de onda introducido por la atmósfera. Es importante destacar que $\chi_a(\mathbf{r})$ y $\phi_a(\mathbf{r})$ describen el efecto de la atmósfera de la Tierra y los tiempos para los cambios en estas funciones estarán dados por la velocidad de las fluctuaciones del índice de refracción en la atmósfera.

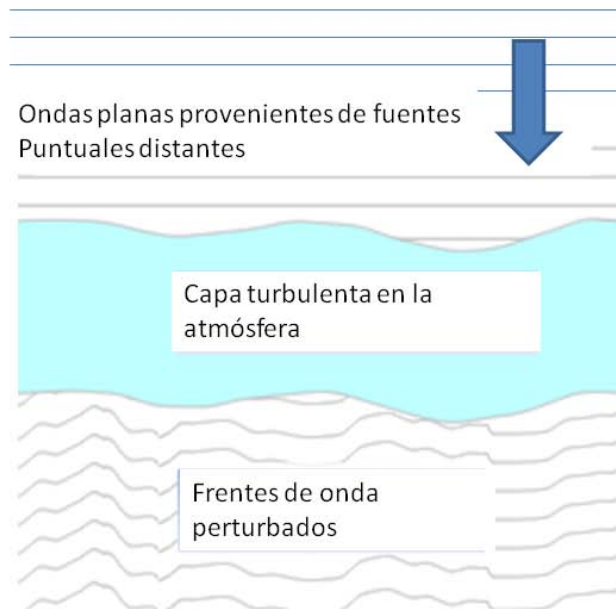


Figura 4.1: Diagrama esquemático ilustrando cómo los frentes de onda ópticos de una estrella distante pueden ser perturbados por una capa de mezcla turbulenta en la atmósfera. La escala vertical de la representación de los frentes de onda está altamente exagerada.

§4.5. El modelo de Kolmogorov de la turbulencia

El modelo de Kolmogorov de la turbulencia nos proporciona una descripción de la naturaleza de las perturbaciones del frente de onda inducidas por la atmósfera. El modelo supone que las perturbaciones del frente de onda son provocadas por las variaciones en el índice de refracción de la atmósfera (Saha 2003)[15].

Estas variaciones del índice de refracción conducen directamente a fluctuaciones de fase descritas por $\phi_a(\mathbf{r})$, pero cualquier fluctuación en amplitud sólo es provocada por un efecto de segundo orden, mientras los frentes de onda perturbados se propagan desde la capa de la atmósfera perturbada al telescopio.

Para todos los modelos de la atmósfera de la Tierra, en longitudes de onda ópticas e

infrarrojas, la formación de la imagen instantánea está dominada por las fluctuaciones de fase $\phi_a(\mathbf{r})$. Las fluctuaciones de amplitud descritos por $\chi_a(\mathbf{r})$ tienen un efecto insignificante sobre la estructura de las imágenes que se ven en el foco de un telescopio grande, como los del OAN.

Por simplicidad, a menudo se supone que las fluctuaciones tienen una distribución aleatoria gaussiana, con la siguiente función de estructura de segundo orden:

$$D_{\phi_a}(\rho) = \left\langle |\phi_a(\mathbf{r}) - \phi_a(\mathbf{r} + \rho)|^2 \right\rangle_{\mathbf{r}}, \quad (4.3)$$

donde $D_{\phi_a}(\rho)$ es la varianza inducida atmosféricamente entre la fase en dos partes del frente de onda, separadas por una distancia ρ en el plano de apertura y la cantidad entre paréntesis angulares representa el ensamble promedio.

Para la aproximación aleatoria gaussiana, la función de la estructura de Tatarski (1961) puede ser descrita en términos de un único parámetro r_0 :

$$D_{\phi_a}(\rho) = 6,88 \left(\frac{|\rho|}{r_0} \right)^{\frac{5}{3}}, \quad (4.4)$$

donde r_0 indica la fuerza de las fluctuaciones de fase, ya que se corresponde con el diámetro de una abertura circular de telescopio, en el que las perturbaciones de fase atmosféricas comienzan a limitar seriamente la resolución de la imagen.

Valores típicos de r_0 , para observaciones en la banda I (longitud de onda de 900 nm) en buenos sitios son de 20 — 40 cm. Cabe señalar, que r_0 también se corresponde con el diámetro de apertura, para el que la varianza σ^2 de la fase del frente de onda promedio sobre la apertura, llega aproximadamente a la unidad:

$$\sigma^2 = 1,0299 \left(\frac{d}{r_0} \right)^{\frac{5}{3}}. \quad (4.5)$$

Esta ecuación representa una definición comúnmente utilizada para r_0 , un parámetro que se utiliza con frecuencia para describir las condiciones atmosféricas en observatorios astronómicas.

El parámetro r_0 puede ser determinado a partir de un perfil C_N^2 medido de la siguiente manera:

$$r_0 = \left(16,7\lambda^{-2}(\cos\gamma)^{-1} \int_0^\infty dh C_N^2(h) \right)^{-\frac{3}{5}}, \quad (4.6)$$

en donde la intensidad de la turbulencia $C_N^2(h)$, varía como una función de la altura h , por encima del telescopio y γ es la distancia angular de la fuente astronómica desde el cenit.

Si se supone que la evolución turbulenta se produce en escalas de tiempo cortas, entonces, la escala de tiempo t_0 , es simplemente proporcional a r_0 dividido entre la velocidad media del viento.

Las fluctuaciones del índice de refracción causadas por la turbulencia aleatoria gaussiana pueden ser simuladas usando el siguiente algoritmo:

$$\phi_a(\mathbf{r}) = \text{Re} [FT [R(\mathbf{k})K(\mathbf{k})]], \quad (4.7)$$

en donde $\phi_a(\mathbf{r})$, es el error de fase óptica introducida por la turbulencia atmosférica.

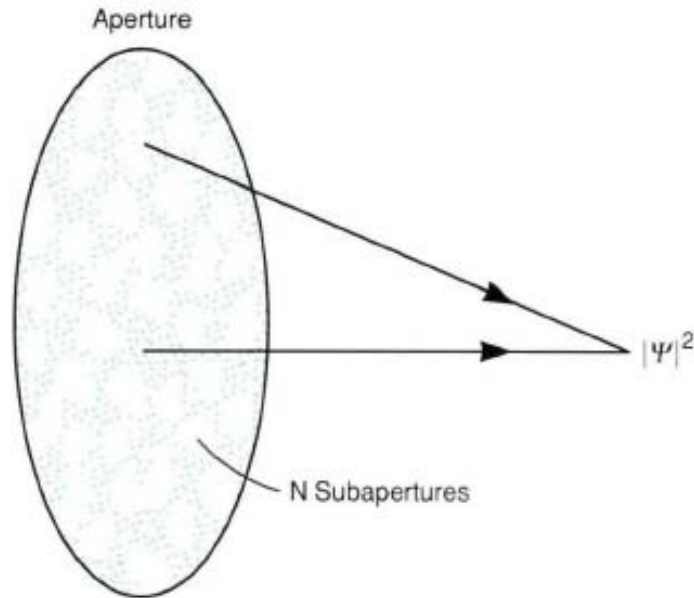
$R(\mathbf{k})$ es una matriz cuadrada de dos dimensiones de números complejos aleatorios independientes, que tienen una distribución de Gauss sobre el espectro de ruido cero y blanco. $K(\mathbf{k})$ es la amplitud real de Fourier esperada del espectro de Kolmogorov (o Von Karman), Re representa la parte real y FT representa una transformada discreta de Fourier del arreglo cuadrado bidimensional resultante (típicamente una FFT).

§4.6. El *seeing* ligado a la Tierra

Un modelo propuesto por Roddier, F. (1986) [14] describe las condiciones de *seeing* causadas por la turbulencia atmosférica. Al considerar intervalos de tiempo, de menos de 10 ms (milisegundos), la turbulencia en la atmósfera puede ser tratada como un patrón congelado de variaciones de fase.

La Figura (4.2), muestra un patrón congelado apropiado de variaciones de fase durante un intervalo amplio de tiempo. El frente de ondas entrante proveniente de un objeto distante sobre la atmósfera, es separado en celdas de fase constante de dimensión r_0 en el plano del objetivo del telescopio.

Si no hubiera atmósfera, el frente de ondas entrante tendría fase constante sobre la superficie completa del objetivo. En intervalos de tiempo subsecuentes, un nuevo patrón de celdas emerge, el cual es diferente en detalle pero similar en propiedades estadísticas



$ \Psi ^2$	$\sum_{i=1}^N \Psi_i ^2$	$\sum_{i \neq j} \sum_i \Psi_i \Psi_j^*$ Suma de fasores no correlacionados
Frecuencias Espaciales Aplicables	Seeing Disk Bajo	Alto
Intensidad	N	$N^{1/2}$
Potencia	N^2	N
Potencia Normalizada	1	$1/N$

Figura 4.2: La división de la apertura de telescopio en N subaperturas efectivas, de acuerdo a la ecuación 4.8. [1]

tal como el tamaño y el número de celdas de fase constante o subaperturas efectivas.

La teoría de la difracción es usada para calcular la imagen resultante en el plano focal del telescopio como la suma de las contribuciones de todas las subaperturas individuales. Con un total de N subaperturas, cada una contribuyendo con una amplitud compleja Ψ_i , la amplitud compleja Ψ del campo cuasi monocromático en el plano focal lleva a una iluminación o intensidad de la imagen dada por la siguiente ecuación (4.8)

$$|\Psi|^2 = \left| \sum_{i=1}^N \Psi_i \right|^2 = \sum_{i=1}^N |\Psi_i|^2 + \sum_{i \neq j} \sum_i \Psi_i \Psi_j^*. \quad (4.8)$$

La intensidad de la imagen instantanea resulta de la suma de dos términos diferentes en la ecuación (4.8). El primer término del lado derecho de la ecuación es la superposición incoherente de las intensidades de todas las subaperturas individuales. Ya que se considera que todas las subaperturas tienen tamaño r_0 , el límite de difracción θ_d , para una subapertura

está dado por la ecuación [4.9]:

$$\theta_d = \frac{0.12}{r_0}. \quad (4.9)$$

Esta contribución a la intensidad de la imagen, la cual describe el *seeing*, no contiene información de la frecuencia espacial alta. La figura (4.3), muestra la relación entre las frecuencias espaciales en el plano focal y las distancias en los planos objetivo.

El segundo término en la ecuación (4.8), una suma de productos cruzados, describe la interferencia entre las subaperturas. Las subaperturas forman un interferómetro multiapertura con diferencias de fase aleatorias entre los elementos separados. El segundo término contiene información de la frecuencia espacial alta de todas las orientaciones y combinaciones de la línea de base presentes en los pares de subapertura.

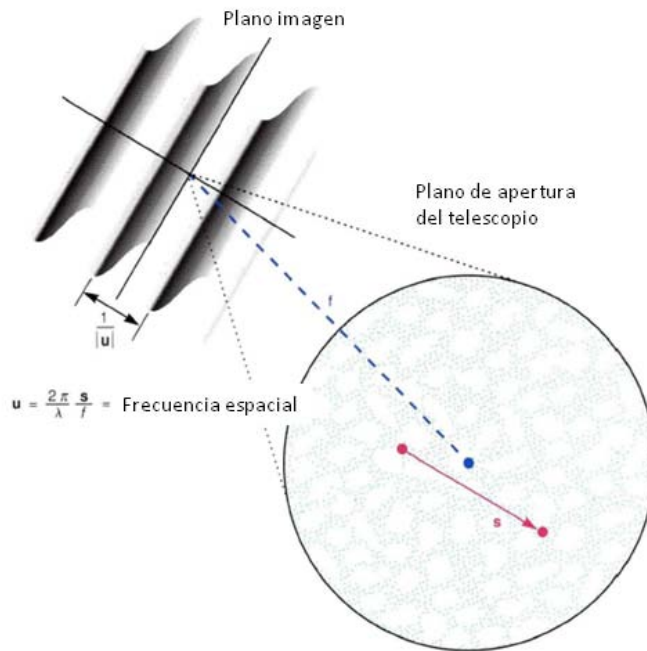


Figura 4.3: La relación entre las frecuencias espaciales en el plano imagen y las separaciones en plano apertura del telescopio. [1]

La combinación de los dos términos en la ecuación (4.8) produce una imagen instantánea del disco de *seeing* ensanchado, con dos características primarias. La imagen llena el disco de *seeing*, descrita por el primer término, dentro del cual hay una estructura fina de manchas brillantes llamadas **motas**, descritas por el segundo término. Las motas contienen información de la frecuencia espacial hasta el límite de difracción del telescopio,

pero el patrón de motas cambia rápidamente, durando generalmente menos de 20 ms (milisegundos).

§4.7. Descripción básica de las técnicas

El principio de todas las técnicas es tomar imágenes de muy corta exposición de blancos astronómicos y después procesar las imágenes de tal forma que se pueda remover el *seeing* astronómico. El uso de estas técnicas permite descubrir estrellas binarias, que de otra manera parecen estrellas individuales para un observador trabajando con un telescopio de similar tamaño.

En teoría, el límite de resolución de un telescopio es una función del tamaño del espejo principal, debido a los efectos de la difracción de Fraunhofer, lo cual, hace que las imágenes dispersas de objetos distantes se reduzcan a una pequeña mancha conocida como el disco de Airy. Un grupo de objetos dispersos sobre una región más pequeña que este límite parece un sólo objeto.

Así, los grandes telescopios no sólo pueden formar imágenes de objetos tenues, debido a que captan más luz en el espejo más grande, sino que tienen la posibilidad de formar imágenes de objetos más pequeños también, lo cual, deja de funcionar debido a los límites prácticos impuestos por la atmósfera, cuyo carácter aleatorio destruye la única mancha del disco de Airy y la convierte en un patrón de puntos de tamaño similar que cubren un área mucho más grande (ver imagen de binarias Fig. 4.4).

Durante muchos años el rendimiento del telescopio estuvo limitado por este efecto atmosférico, hasta la introducción de la interferometría de motas y la óptica adaptativa que proporcionaron caminos para eliminar esta restricción.

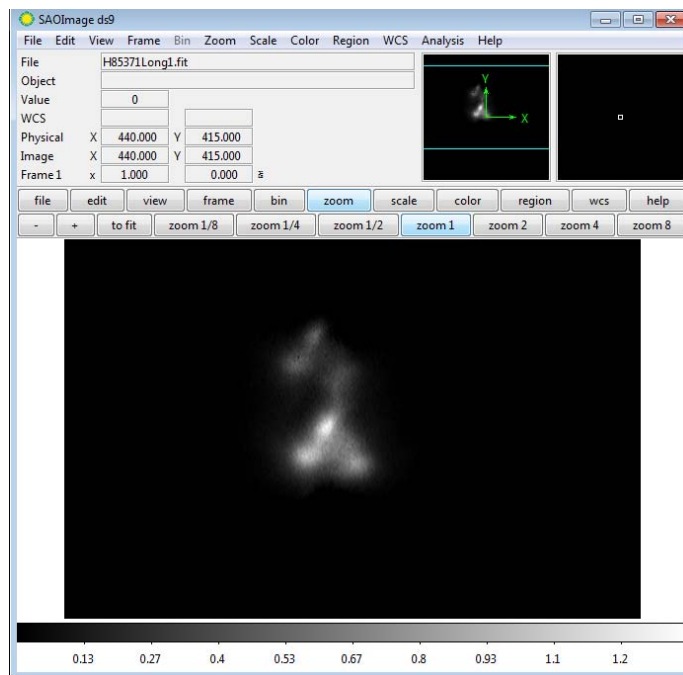


Figura 4.4: Imagen-exposición corta típica de una estrella binaria (HIP85371), como se ve a través del *seeing* atmosférico. Cada estrella debe aparecer como un solo punto, pero la atmósfera hace que las imágenes de las dos estrellas se dividan en dos patrones de manchas (un patrón de arriba a la izquierda, y el otro abajo a la derecha). Las motas se mueven alrededor rápidamente, de modo que cada estrella aparece como una única mancha borrosa en imágenes de larga exposición de 1 minuto. (Telescopio de 1.5m OAN-San Pedro Martir, Ensenada, Baja California, México. 9 de abril del 2009, 3:39 tiempo local).

La formación de imágenes de motas recrea la imagen original a través de técnicas de procesamiento de imágenes. La clave de la técnica, encontrada por el astrónomo estadounidense Fried, D. L., (1966) [3], fue tomar imágenes muy rápidas en las que la atmósfera está efectivamente *congelada* en su posición. Para imágenes infrarrojas, los tiempos de exposición son del orden de 100 ms, pero para la región visible hay que dejar tan solo unos 10 ms.

En las imágenes en esta escala de tiempo, o más pequeño, el movimiento de la atmósfera es demasiado lento para tener un efecto; las motas grabadas en la imagen son una captura del *seeing* atmosférico en ese instante.

Por supuesto, hay un inconveniente: la toma de imágenes de tan corta exposición es difícil, y si el objeto es demasiado débil, entonces, la luz capturada será insuficiente como para que el análisis sea posible. Los primeros usos de la técnica, en la década de 1970, se hicieron en una escala limitada, usando las técnicas fotográficas, pero como la película

fotográfica capta sólo el 7% de la luz entrante, sólo los objetos más brillantes podían ser procesados de esta forma.

La introducción del CCD en astronomía, que captura más del 70% de la luz, bajó las exigencias técnicas enormemente en las aplicaciones prácticas, y hoy en día la técnica se utiliza ampliamente en los objetos astronómicos brillantes, por ejemplo, estrellas y sistemas estelares.

El hecho de que muchos de los métodos de formación de imágenes de motas, tengan varios nombres es resultado en gran parte, de que los astrónomos profesionales y aficionados reinventan las técnicas existentes de imágenes de motas y les dan nuevos nombres.

§4.8. Desplazar y sumar

El método de desplazar y sumar (SAA), *Shift and add*, en idioma inglés, más recientemente el método de *apilamiento de imagen*, es una forma de construcción de imágenes de motas, comúnmente utilizado para la obtención de imágenes de alta calidad a partir de una serie de exposiciones de corta duración, con diferentes cambios de imagen. Se ha utilizado en astronomía por varias décadas y es la base para la estabilización de la imagen característica en algunas cámaras.

El método; *shift and add*, implica el cálculo de los cambios diferenciales de las imágenes. Esto se logra fácilmente en imágenes astronómicas, ya que pueden estar en línea con las estrellas. Una vez que las imágenes están alineadas se promedian en conjunto.

Es un principio básico de la estadística que la variación en una muestra puede reducirse haciendo un promedio de los valores individuales juntos. De hecho, cuando se utiliza un promedio, la relación de señal a ruido debe aumentar en un factor de la raíz cuadrada del número de imágenes. Varios paquetes de software existen para llevar a cabo esto, incluyendo IRAF, RegiStax, Keiths Image Stacker, Hugin y Iris.

Hay diferentes métodos de interferometría de motas, Labeyrie (1970) [5], que permiten recuperar la información del límite de difracción, relacionada con los objetos astronómicos. Uno de ellos es la aproximación desplazar y sumar, cuyo enfoque, fué presentado por Bates y Cady (1980), para la posterior reducción de datos de los conjuntos de imágenes de corta exposición (*specklegrams*). El método encuentra los puntos más brillantes en cada imagen, la imagen se desplaza de tal manera que este punto se mueve al centro de la imagen y luego promedia todas las imágenes desplazadas juntas. Figura (4.5).

La imagen SAA resultante, contiene una imagen del límite de difracción de telescopio, que se sobrepone a la base del límite, dado por el *seeing*.

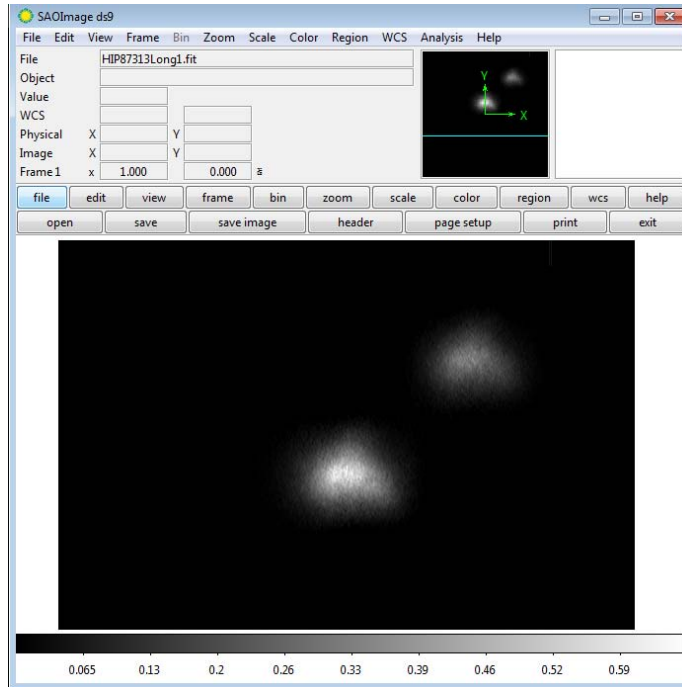


Figura 4.5: Imagen promediada, de una estrella binaria (HIP87313). Se promediaron 1500 imágenes con un tiempo de exposición de 10 ms. (Telescopio de 1.5m OAN-San Pedro Martir, Ensenada, Baja California, México. 9 de Mayo del 2009, 4:51 tiempo local).

Resumiendo las consideraciones anteriores, podemos concluir que los sistemas adaptativos SAA tienen características atractivas, que pueden ser utilizados para observaciones astronómicas. Sin embargo, un desarrollo exitoso de estos sistemas necesita ciertas investigaciones preliminares.

§4.9. Interferometría de motas como solución a la distorsión atmosférica

Los intentos para evitar el problema del *seeing*, creado por la distorsión atmosférica, han tenido dos aproximaciones. En la primera aproximación, la compensación mecánica de un espejo en la trayectoria de la luz produce correcciones en tiempo real a las distorsiones del frente de ondas, Higgs et al (1989), [4].

En la segunda aproximación, llamada *Interferometría de motas*, una imagen reconstruida, se obtiene al calcular la transformada de Fourier de la combinación de la amplitud y el mapa fase producido por la evaluación del espectro y biespectro de potencias, para miles de exposiciones ruidosas cortas.

Los astrónomos, en las pasadas décadas, desarrollaron varias técnicas para minimizar los efectos de la distorsión atmosférica. Labeyrie, A. (1970) [5] hizo la primera gran contribución cuando notó que la estructura de motas en imágenes astronómicas de exposición muy corta era similar a la estructura observada con difusores iluminados por laser.

Labeyrie aplicó un formalismo al problema y extrajo información de alta frecuencia espacial no disponible previamente para los astrónomos. El proceso que él desarrolló es conocido como *interferometría de motas*.

Hagamos que $i(\mathbf{x})$ represente la imagen bidimensional observada $i(x, y)$ y $o(\mathbf{x})$ represente el objeto correspondiente $o(x, y)$. La función combinada punto-dispersión atmosférica-telescopio $t(\mathbf{x})$, describe la distribución de luz, cuando un punto de luz es captado por el telescopio. En este caso isoplanático, tenemos la ecuación (4.10).

$$i(\mathbf{x}) = \mathbf{o}(\mathbf{x}) * \mathbf{t}(\mathbf{x}), \quad (4.10)$$

en donde $*$ denota la *convolución bidimensional* para el proceso de imagen. En la transformada de Fourier o representación de la frecuencia espacial de la ec. (4.10), la condición isoplanática es escrita como (ecuación [4.11]):

$$I(\mathbf{u}) = \mathbf{O}(\mathbf{u}) \bullet \mathbf{T}(\mathbf{u}), \quad (4.11)$$

en donde \mathbf{u} es la variable bidimensional frecuencia espacial, correspondiente a la variable espacial \mathbf{x} y \bullet , representa el producto punto o interno de los dos vectores.

Labeyrie enfrentó un problema experimental; una imagen, altamente magnificada de una fuente puntual, como una estrella, podría ser obtenida de una breve exposición fotográfica. Sin embargo, la alta magnificación dispersa la luz en su detector, por lo que resultó una exposición total pequeña. Claramente, una sola exposición que congele la turbulencia no era suficiente, se hicieron exposiciones adicionales, pero produjeron diferentes muestras de turbulencia y al promediar muchas exposiciones directamente, se reproducía simplemente el resultado de un mal *seeing*.

En vez de eso, Labeyrie se concentró en el espectro de potencias del conjunto de cuadros (frames). El tiempo promedio de la potencia es:

$$\langle |I(\mathbf{u})|^2 \rangle = |O(\mathbf{u})|^2 \langle |T(\mathbf{u})|^2 \rangle. \quad (4.12)$$

El lado izquierdo de la Ec. (4.12) es el espectro de potencias del tiempo promedio de la imagen. Puede ser determinado en cualquier experimento en el cual se acumule una secuencia de exposiciones de corta duración. El lado derecho contiene dos términos; el primero es el espectro de potencias del objeto (considerando que es constante durante la exposición), el segundo término es la función de transferencia para el sistema combinado atmósfera-telescopio.

El segundo término puede ser evaluado en principio por una medición separada de una fuente puntual, como una estrella, bajo las mismas condiciones de *seeing*. Una vez que la medición ha sido realizada, la Ec. (4.12), puede ser resuelta para el espectro de potencias del objeto.

Esta técnica, ha sido aplicada extensivamente a mediciones de pares de estrellas binarias cercanas, McAlister, H. A., (1985), [6]. La reconstrucción de imágenes no es posible con la técnica de Labeyrie debido a que el espectro de potencias del objeto contiene sólo información sobre las amplitudes y no sobre las fases del objeto. En objetos simples, tales como estrellas dobles, el espectro de potencias revela sólo la separación angular ρ , con una ambigüedad de 180° y la diferencia de magnitud entre el par de estrellas.

Para objetos, tales como los satélites artificiales, que reflejan muy poca luz en un intervalo de tiempo breve, la interferometría de motas no es apropiada y se han hecho esfuerzos considerables para encontrar métodos para obtener la información de fase para las imágenes ópticas, Dainty, J. C., (1987), [2].

Capítulo 5

Interferometría de motas con el equipo astronómico Dragon

§5.1. Equipo astronómico Dragon

El equipo DRAGON, Voitsekhovich et al. 2005 [17], constituye un nuevo instrumento astronómico diseñado para llevar a cabo diversas investigaciones relacionadas con óptica adaptativa, óptica activa, astronomía observacional e instrumentación astronómica. En esta tesis se presentan los resultados de las primeras pruebas de este instrumento llevadas a cabo en el OAN-Tonantzintla (México) y de dos temporadas de observación en OAN-Tonantzintla (México) y OAN-San Pedro Mártir (México), para las cuales se tomó una muestra de 837 sistemas del catálogo HIPPARCOS por su cercanía al sistema solar y tomando en cuenta la visibilidad de estos objetos en las temporadas de observación planeadas.

Durante el siglo XX, varias instituciones como el Observatorio Naval de los Estados Unidos han realizado proyectos para la medición de las paralajes de las estrellas más próximas. Sin embargo, el programa que ha tenido más éxito ha sido la misión Hipparcos (por el astrónomo helénico Hiparco de Nicea) de la Agencia Espacial Europea, que estuvo en órbita de manera activa entre 1989 y 1993.

Entre sus resultados destaca la medición de las posiciones de manera muy precisa de 100,000 estrellas, incluyendo sus distancias. Además produjo un segundo catálogo, denominado Tycho, en honor del astrónomo Tycho Brahe, con medidas menos precisas para otro millón de estrellas.

Los datos de Hiparco han sido esenciales para mejorar los fundamentos de la astrofísica

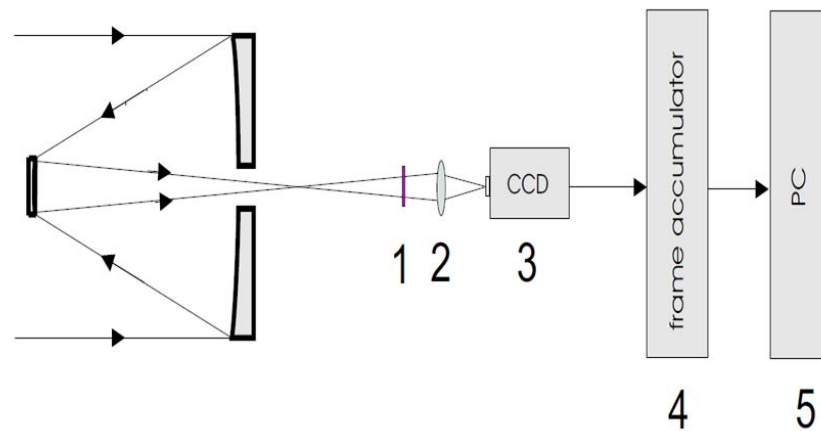
en múltiples campos, especialmente en lo que respecta a la evolución estelar. Dos ejemplos se pueden citar. Hipparcos ha producido el diagrama Hertzsprung-Russell (HR) más preciso y las precisas medidas astrométricas han sido utilizadas para medir las órbitas de distintas binarias visuales, lo que permite estimar las masas de las componentes de manera muy precisa.

El diagrama HR, una figura que muestra la luminosidad de una estrella frente a su temperatura superficial u otras magnitudes relacionadas con éstas, es una herramienta extraordinaria, pues nos permite ver la evolución de una estrella en función de su masa. Para entenderlo es indispensable el cálculo preciso de las distancias, con objeto de derivar las luminosidades absolutas. Y aquí es donde Hipparcos ha tenido un papel esencial.

El equipo DRAGON es un instrumento que permite llevar a cabo varios tipos de investigaciones experimentales, relacionadas con óptica adaptativa, óptica activa, astronomía observacional e instrumentación astronómica. El equipo consiste de tres canales ópticos independientes pero sincronizados temporalmente que amplían la variedad de aplicaciones posibles.

El esquema completo del equipo se muestra en la Figura (6.1). La luz de una estrella captada por el telescopio se divide en tres haces por los divisores de haz. Cada uno de los haces se dirige a la cámara CCD que graba los marcos, los digitaliza y los envía al canal correspondiente del acumulador de marcos.

Después de terminar un experimento, la información recabada por el acumulador de marcos es reescrita de su memoria interna al disco duro de la PC. La PC además controla todas las operaciones realizadas por el equipo y permite a uno asignar todos los parámetros para un experimento y realizar la reducción de datos.



sp.png

Figura 5.1: El esquema óptico del interferómetro de motas. 1- El típico filtro de interferencia R. 2- Lentes Ópticos. 3-Detector (camara CCD). 4- Acumulador de marcos (frames). 5-Computadora. [12]

La Figura (6.1), muestra la configuración completa del equipo cuando los tres canales están instalados. Sin embargo, dependiendo del tipo de experimento realizado, es posible usar configuraciones experimentales más simples con menos de tres canales. También el diseño del equipo permite la instalación de elementos ópticos adicionales. Algunas configuraciones viables para ciertas investigaciones se discuten abajo.

§5.2. Características técnicas del equipo

Camaras CCD

El equipo incluye tres camaras CCD. La imagen de una sólo cámara se presenta en la Figura (5.2). Las principales características de las cámaras CCD son:

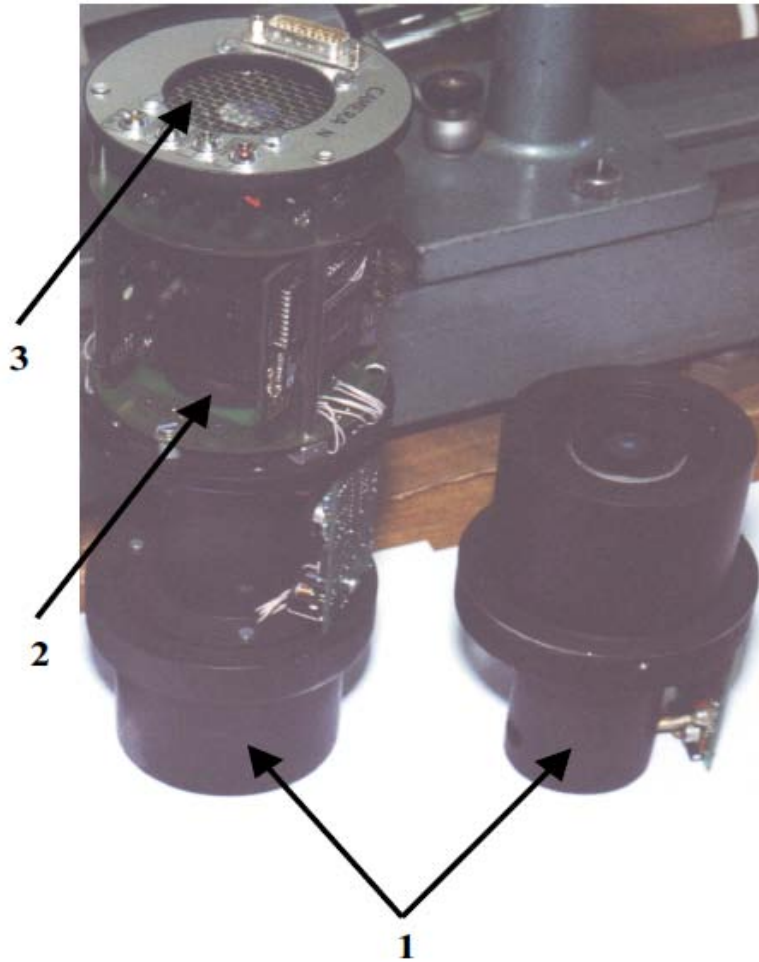


Figura 5.2: Cámara CCD. 1-Intensificador de luz, 2-Unidad de enfriamiento Peltier, 3-Ventilador. [12]

Tipo de CCD:

Sony ICX415AL.

Escaneo progresivo de 8mm en diagonal.

Tamaño de CCD: 584-582 px.

Pixel: cuadrado de 8.3 x 8.3 μm .

Dos regímenes de grabación de marcos:

-Exposición corta. máxima de 5 hz (20 ms)

-Acumulación: hasta 10 s, con enfriamiento de Peltier.

Los dos regímenes de grabación de marcos, permiten extender el rango de la aplicabilidad del equipo. Por ejemplo, la grabación de marcos rápida puede ser usada

para investigaciones relacionadas a la óptica adaptativa, mientras que el régimen de acumulación es más adecuado para aplicaciones astronómicas.

La sensibilidad de las cámaras CCD puede ser incrementada al instalar intensificadores de luz. El intensificador de luz permite trabajar con objetos débiles en el régimen de exposiciones cortas y tiene las siguientes características:

Tipo: bandeja microcanal.

Amplificación: regulada por computadora, ganancia de hasta 104.

Tipo de instalación: removible.

Para reducir el nivel de ruido, la cámara está equipada con una unidad de enfriamiento de célula Peltier, teniendo la opción de dejarla encendida o apagada. Todos los parámetros de la cámara se controlan por computadora. También el programa de computadora permite la previsualización en tiempo real de las imágenes grabadas por las tres cámaras.

§5.3. Acumulador de marcos

El acumulador de marcos provee la acumulación en tiempo real de los marcos grabados por las cámaras. Para proveer el almacenaje de datos simultáneos de las tres cámaras, el acumulador de marcos tiene tres canales separados. Cada canal permite el almacenaje en tiempo real de hasta 512 Mb de datos durante un sólo experimento.

Después de terminar un experimento los datos son guardados en el dispositivo de almacenamiento externo (CD o el disco duro de la PC) y la memoria del acumulador interno, se limpia para que esté lista y vacía para el siguiente experimento.

§5.4. Algunas posibles investigaciones experimentales con el equipo DRAGON

El equipo DRAGON está diseñado, para ser usado en muchos tipos de investigaciones. Una lista corta de posibles investigaciones es la siguiente:

- Monitoreo del frente de onda de óptica adaptativa.
- Guiado de telescopio.
- Efectos de anisoplanatismo en óptica adaptativa.
- Monitoreo de la curvatura del frente de onda de imagen única.

- Tomografía atmosférica.
- Influencia de la turbulencia en la calidad de las imágenes astronómicas.
- Prueba óptica de la calidad del espejo del telescopio.
- Interferometría de motas.

§5.5. Comparación de los sensores del frente de onda de la Óptica Adaptativa

Los sistemas de óptica adaptativa están encontrando más aplicaciones en observaciones astronómicas. El sensor de frente de ondas es una de las partes más importantes en un sistema de óptica adaptativa, porque la calidad de la corrección adaptativa depende fuertemente de los datos provenientes del sensor (Noll 1978). El equipo DRAGON permite estimar y comparar experimentalmente la calidad de los diferentes sensores de frente de ondas (Rigaut, Ellerbroek, Northcott 1997). Uno de los posibles esquemas viables para tal tipo de investigaciones se muestra en la Figura (5.3).

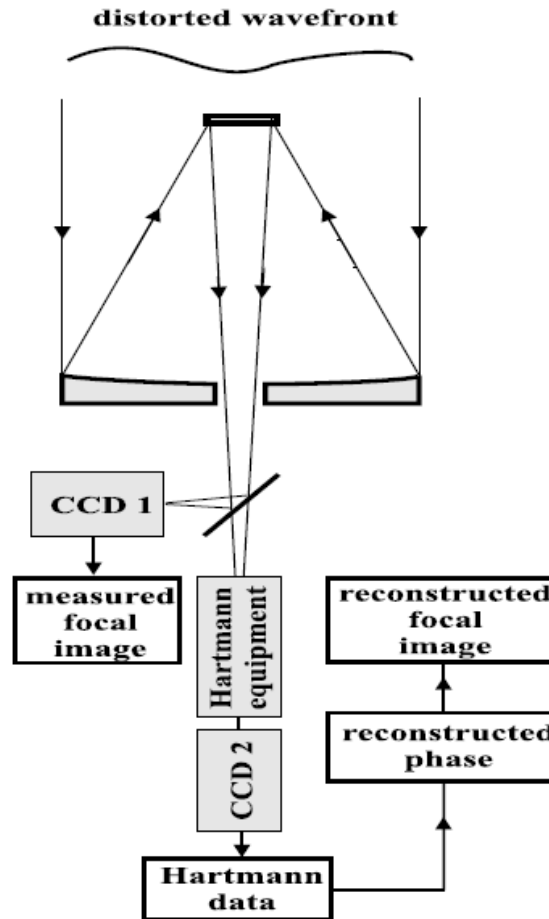


Figura 5.3: Esquema para la estimación experimental de la calidad de la prueba de Shack-Hartmann [12]

La luz distorsionada, por la turbulencia atmosférica, es colectada por el telescopio. El divisor de haz montado cerca del plano focal del telescopio divide el haz entrante enfocado en dos haces. El primer haz forma la imagen distorsionada en el plano focal del telescopio, la cual se graba por la primera cámara CCD (CCD 1).

El segundo haz se dirige al sensor Shack-Hartmann, el cual obtiene la imagen de Hartmann (Shack y Platt 1971). La imagen de Hartmann se graba por la segunda cámara (CCD 2). Ambas cámaras están sincronizadas y trabajan en el régimen rápido y permiten acumular los dos conjuntos de marcos; el primer conjunto consiste de las imágenes distorsionadas, mientras que el segundo contiene los datos de Hartmann correspondientes.

Usando los datos de Hartmann se puede reconstruir la distorsión de fase en la apertura para cada marco y calcular la correspondiente imagen distorsionada. Comparando la

imagen distorsionada calculada con la medida uno puede estimar la calidad del sensor de Shack-Hartmann bajo investigación (Voitsekhovich et al. 2001).

La calidad de otros tipos de sensores pueden ser estimados aplicando una aproximación similar, pero ajustada al tipo de sensor particular. Por ejemplo, al instalar los tres canales se puede estimar la calidad de otro método de mediciones del frente de onda: el monitoreo de curvatura (Roddier 1988).

Finalmente, al analizar la estadística obtenida por diferentes tipos y esquemas de sensores es posible concluir cuál es más viable para aplicaciones específicas.

§5.6. Calidad del guiado del telescopio

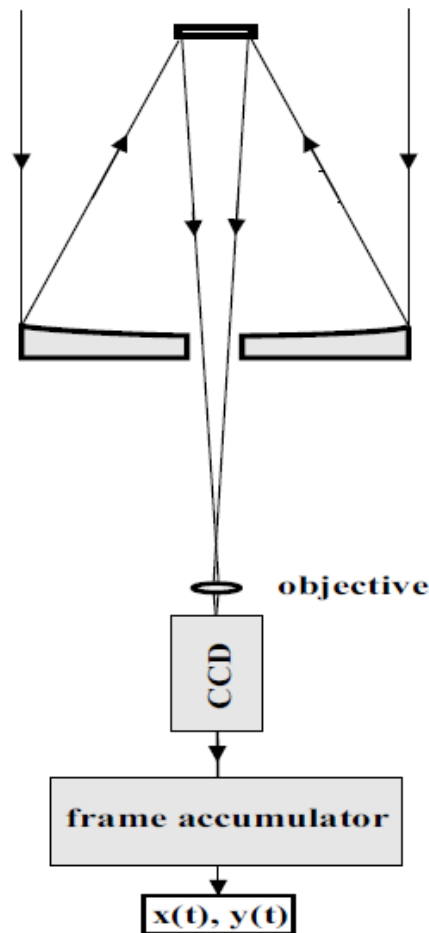


Figura 5.4: Arreglo experimental para de guiado del telescopio; $[x(t), y(t)]$ son las coordenadas del centroide de la imagen dependientes del tiempo. [12]

§5.7. PROBLEMA ANISOPLANÁTICO EN SISTEMAS ADAPTATIVOS 51

Una alta calidad en el guiado del telescopio es uno de los puntos importantes para obtener datos astronómicos de alta resolución espacial. El equipo DRAGON permite obtener los datos experimentales, los cuales después de una reducción adecuada, nos dan toda la información necesaria relacionada al guiado del telescopio. El arreglo experimental viable para tal tipo de investigaciones se muestra en la Figura (5.4).

La luz de una estrella se capta por el telescopio y el conjunto de imágenes focales se graba por la cámara CCD. Durante el experimento las imágenes focales digitalizadas se acumulan por el acumulador de marcos. La reducción de datos preliminar consiste del cálculo de los centriodes de la imagen para cada marco. Como un resultado de la reducción de datos preliminar conseguimos los datos que muestran cómo el centroide de la imagen se mueve con el tiempo $[x(t), y(t)]$.

Estos movimientos del centroide de la imagen se deben principalmente a tres razones:

- La turbulencia atmosférica (aleatoria, movimientos rápidos).
- Errores del guiado del telescopio (lentos, más o menos armónico).
- Brincos en el guiado (lento).

Usando métodos adecuados de análisis (por ejemplo, filtrado de Fourier) se pueden separar los movimientos relacionados a la turbulencia atmosférica de los debidos al guiado del telescopio. Finalmente, analizando los datos filtrados, es posible conseguir todas las características del guiado del telescopio.

§5.7. Problema Anisoplanático en Sistemas Adaptativos

Los sistemas de óptica adaptativa permiten reducir la influencia de la turbulencia atmosférica en la calidad de los datos astronómicos. Sin embargo, para poder observar estrellas débiles con la corrección de la óptica adaptativa, un sistema de óptica adaptativa tiene que usar una estrella de referencia suficientemente brillante para tomar mediciones del frente de onda en tiempo real.

Tal uso de un sistema de óptica adaptativa se denomina corrección de óptica adaptativa fuera de eje (Orlov et al. 2003; Voitsekhovich, Bara 1999) y se ilustra esquemáticamente en la Figura (5.5).

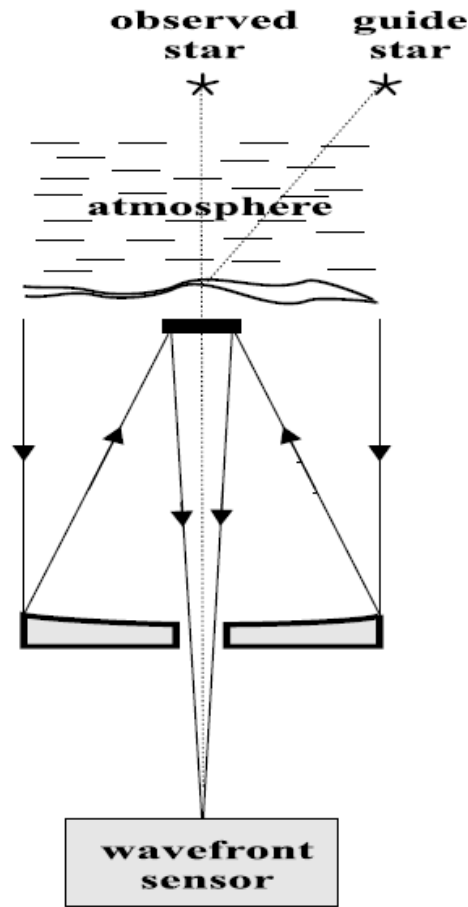


Figura 5.5: Sensado del frente de onda de óptica adaptativa con el uso de una estrella guía de referencia [12]

Un sistema de óptica adaptativa usa una estrella de referencia brillante para conseguir los datos del frente de onda y después se aplica la corrección obtenida para mejorar la calidad de la imagen de la estrella observada. Sin embargo, la luz de las dos estrellas pasa a través de diferentes partes de la atmósfera; por eso las distorsiones del frente de ondas con cada estrella no son iguales. Como resultado, debido a que la diferencia entre los dos frentes de onda se incrementa al incrementar la separación de las estrellas, entre más grande sea la separación, peor es la calidad de la corrección.

Aún más, iniciando con una separación, la corrección de óptica adaptativa con una estrella de referencia puede hacer que la calidad de la imagen observada sea peor de lo que sería sin corrección (Fried 1982). Por eso es importante estimar experimentalmente la eficiencia de la corrección de óptica adaptativa fuera de eje bajo condiciones de observación reales. El equipo DRAGON le permite llevar a cabo ese tipo de experimentos usando el arreglo mostrado en la Figura (5.6).

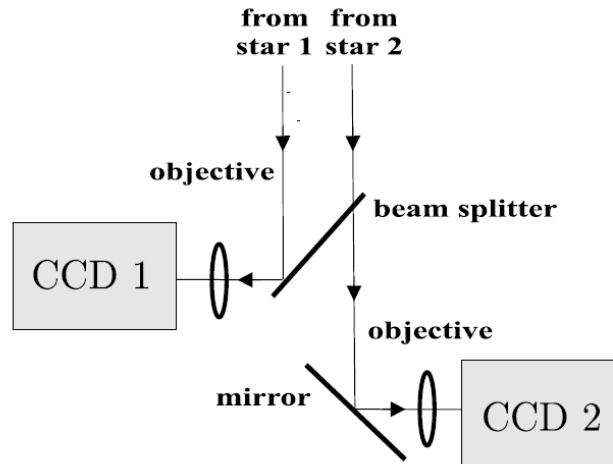


Figura 5.6: Arreglo experimental para investigaciones anisoplanáticas. [12]

El arreglo experimental consiste de dos cámaras CCD sincronizadas trabajando en el mismo régimen. La luz proveniente de las dos estrellas, separadas por alguna distancia angular pasa a través del telescopio el cual forma las imágenes distorsionadas por la turbulencia atmosférica. Cada imagen es agrandada por el objetivo y grabada por la cámara correspondiente. El espejo se puede mover en la dirección horizontal para proveer el posicionamiento de la imagen en el segundo CCD.

El uso de las dos cámaras con los objetivos permite grabar las imágenes detalladas de las estrellas con separaciones de hasta el campo de visión completo del telescopio. También, el esquema con las dos cámaras permite trabajar con estrellas de diferentes magnitudes. Durante el experimento, los dos conjuntos de imágenes son acumulados por el acumulador de marcos.

La reducción de datos consiste en la comparación de las imágenes de las dos estrellas. Tal comparación puede ser hecha mediante el cálculo de los momentos de las imágenes. Finalmente, obteniendo los datos para diferentes separaciones de estrellas, varias condiciones de turbulencia y haciendo uso del análisis estadístico, se puede estimar la eficiencia de la corrección de óptica adaptativa fuera de eje.

§5.8. Sensado de la Curvatura del Frente de Onda de la Imagen y Tomografía Atmosférica

Hickson (1994) sugirió usar sólo una imagen pupila desenfocada para reconstruir la forma del frente de onda, dando así una demostración experimental de la factibilidad de

la técnica (Hickson and Burley 1994). Además, una sola imagen de estrella desenfocada contiene suficiente información para determinar las fluctuaciones de la fase espacial del frente de ondas incidente.

Un sensor CCD el cual responde a la distribución de la intensidad en la imagen produce señales proporcionales a la curvatura del frente de onda dentro de la pupila y la pendiente radial en la frontera de la pupila. Sin embargo, a diferencia de la técnica de sensado de la curvatura diferencial de Roddier, un sensor de imagen simple no cancela las fluctuaciones de intensidad debido a la cintilación atmosférica (Voitsekhovich, Sánchez, and Orlov 2002; Voitsekhovich and Sánchez 2003).

Esas mediciones son afectadas por la cintilación, la cual es proporcional a la curvatura del frente de onda de cada capa perturbada pesada por su distancia de la pupila del telescopio. De hecho, como sugirió Ribak (1995). Tal dependencia puede usarse para separar el origen de la deformación del frente de onda, abriendo así la posibilidad de la técnica de tomografía atmosférica.

§5.9. Comprobación de resultados en el Observatorio Astronómico Nacional de Tonantzintla

Las primeras observaciones con el equipo DRAGON se realizaron en Marzo de 2004 en el observatorio de Tonantzintla OAN (México) con el telescopio de 1 m. Los logros principales de las observaciones han sido los siguientes:

- Checar la viabilidad del equipo en las condiciones del observatorio.
- Probar la sensibilidad de las camaras CCD.
- Obtener datos preliminares para el desarrollo de los metodos viables para investigaciones del guiado del telescopio.
- Decidir qué modificaciones del equipo se necesitaban para las investigaciones relacionadas al problema anisoplanático en sistemas adaptativos astronómicos.

La prueba de sensibilidad límite ha sido realizada en el régimen rápido de grabación de marcos (tiempo de exposicin de 20 ms) para la cámara con el intensificador de luz instalado. Como un objeto de prueba se eligió el famoso cmulo del Trapecio de θ Ori. Los resultados de la prueba se ilustran en la Figura (5.7) y muestran una alta sensibilidad de cámara, sin importar condiciones de observación desfavorables como la contaminación lumínica, nubes y un alto nivel de turbulencia atmosférica, lográndose ver estrellas tan débiles como magnitud 11.



Figura 5.7: Sensibilidad límite de la cámara CCD. Cúmulo del Trapecio θ Ori, exposición de 20-ms, mostrando estrellas de hasta 11 (mag). [12]

Los datos preliminares para el desarrollo de los métodos relacionados a las investigaciones del guiado del telescopio han sido obtenidos con el mismo objeto; θ Ori. Los datos consisten en un conjunto de marcos obtenidos en el régimen de acumulación (tiempo de exposición de 1 s). Para obtener una resolución espacial viable, la observación fue realizada en un foco efectivo largo de 100m. Un marco típico único de este conjunto de datos se muestra en la Figura (5.8).

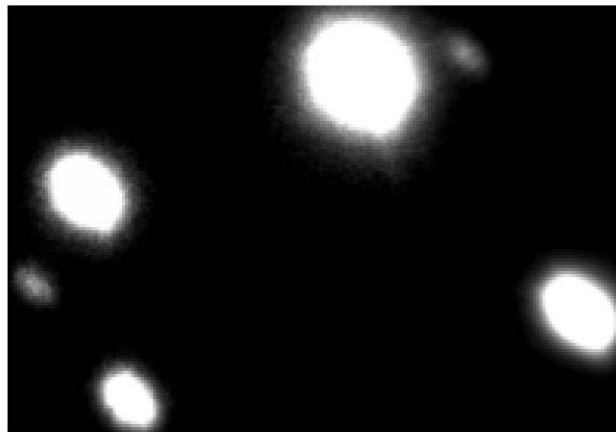


Figura 5.8: Datos de guiado del telescopio: marco único de 1 segundo de integración mostrando estrellas con separación de hasta 19 segundos de arco, [12].

En este marco se puede ver la forma elíptica de las imágenes la cual es debido a los errores del guiado del telescopio. Para estimar numéricamente la magnitud de los errores de guiado y su comportamiento temporal se calcularon los movimientos del centroide de la

imagen mostrado en la Figura [5.9].

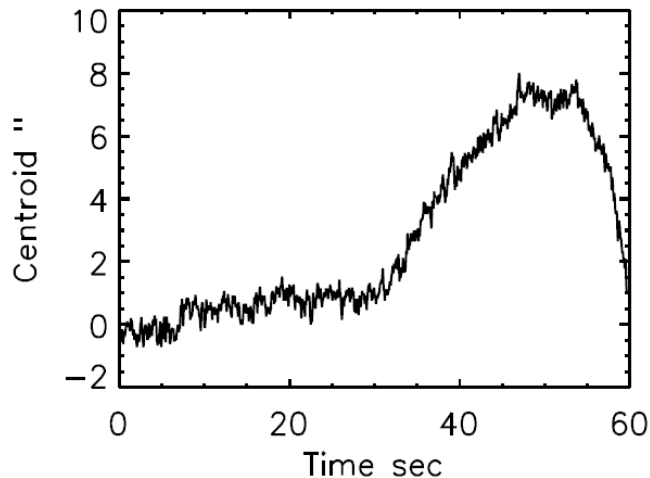


Figura 5.9: Datos de guiado del telescopio: desplazamiento del centroide de la imagen en segundos de arco como función del tiempo. [12]

Analizando este gráfico se pueden separar tres tipos de errores de interés: la dirección lineal, más o menos oscilaciones harmónicas y el brinco. Como uno puede ver, el error de guiado más grave es el brinco: su magnitud máxima alcanza hasta 7"; sin embargo, es suficientemente grande para afectar la calidad de las imágenes astronómicas.

El último conjunto de datos obtenidos durante las observaciones está relacionado al problema de anisoplanático. Los datos fueron obtenidos en el régimen de grabado de marco rápido y usados para el desarrollo del esquema experimental mostrado en la Figura 5.6. Para entender por qué elegimos el esquema de dos cámaras en vez del mucho más simple de una cámara, analicemos las imágenes mostradas en la Figura (5.10). En esta figura se presentan dos marcos de corta exposición típicos obtenidos para dos estrellas con poca separación (Binaria en Leo, HR 4057 y 4058, separación 5 segundos de arco).

En la Figura (5.10) se nota que las imágenes de motas están fuertemente distorsionadas por la turbulencia atmosférica. Sin embargo, a pesar de un nivel alto de turbulencia, están bien correlacionadas. Esto significa que si queremos investigar los límites del área isoplanática, el equipo nos permite observar estrellas con una separación más grande por lo menos hasta 1 minuto de arco.

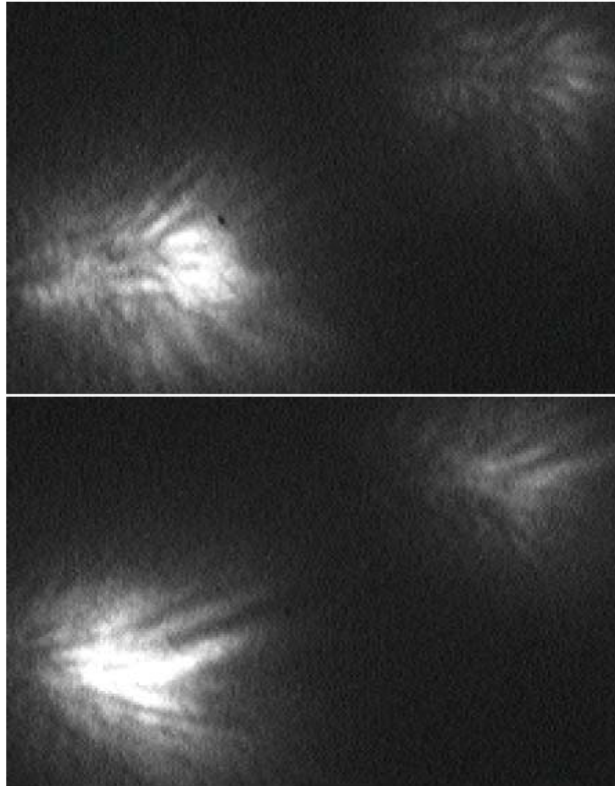


Figura 5.10: Imágenes de corta exposición distorsionadas por la turbulencia de la binaria en Leo (Magnitudes visuales de 2.6 y 3.8 respectivamente, separación angular 5"). [12]

Para poder realizar un análisis de correlación de alta calidad, cada imagen tiene que ser agrandada para tener un tamaño en la entrada del CCD de alrededor de 100 píxeles como mínimo. Cálculos simples muestran que es imposible satisfacer estos dos requerimientos usando un esquema de cámara simple.

Comparando la intensidad de las dos imágenes, éstas difieren hasta por 1.2 magnitudes y mientras que la de la izquierda es reducible, la reducción de datos de la de la derecha es muy complicada debido a su baja intensidad. Sin embargo, el uso del esquema de dos cámaras (Figura 5.6) permite evitar este problema eligiendo diferentes amplificaciones para cada cámara.

Las características técnicas y posibles aplicaciones del equipo Dragon se han presentado. La primera prueba del instrumento en el observatorio OAN ha mostrado su viabilidad y alta sensibilidad.

Capítulo 6

Interferometría de Motas en el telescopio del OAN-Tonanzintla

§6.1. Antecedentes

Se empezó a trabajar en estrellas binarias, usando la interferometría de motas con el telescopio de 1m del OAN, (Observatorio Astronómico Nacional), en Tonanzintla, Puebla, México. La primera temporada de observación fue en febrero de 2006 y se usó el equipo DRAGON, diseñado para llevar a cabo experimentos relacionados con imágenes astronómicas de alta resolución.

Esto último significa que para un telescopio de 1m como el del OAN-Tonanzintla se puede llegar hasta una resolución de 0.1 segundos de arco, la cual es suficiente para estudiar muchos sistemas binarios visuales y sistemas de estrellas múltiples, lo cual es nuestro principal propósito.

El equipo DRAGON requirió algunas modificaciones menores, como incluir un objetivo adicional y un filtro de interferencia, para poder obtener datos adecuados para la interferometría de motas; Voitsekhovich et al. [17]. Se anexa, por completez, el esquema óptico de las partes del instrumento en la Figura (6.1).

Esta temporada de observación y los datos obtenidos se hicieron con el fin de seleccionar los parámetros del esquema óptico y obtener una resolución sobre el plano del CCD del orden de 0.045 segundos de arco/pixel, donde el campo total de visión en el plano del CCD es de 23x23 segundos de arco y para proporcionar coherencia, teniendo en cuenta la interferencia estándar, se usó el filtro R .

La reducción de los datos consiste en eliminar lo más posible la influencia de la atmósfera, con cualquiera de los dos métodos: el de correlación o el de análisis de Fourier; la elección del mismo depende de la separación de las estrellas, las condiciones de observación y las características del equipo.

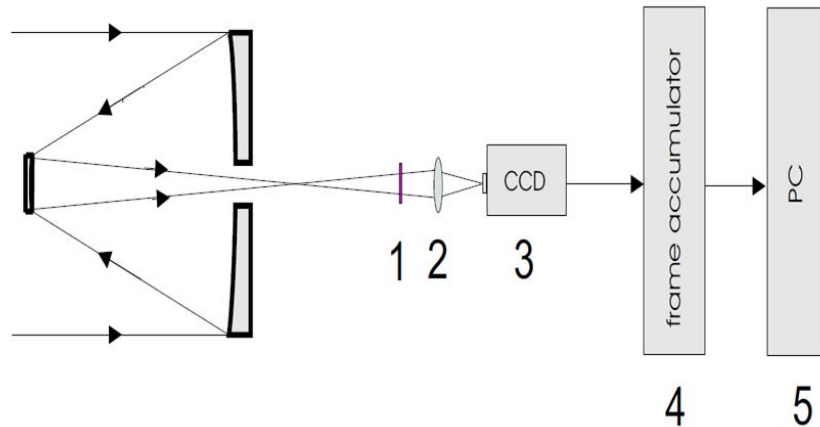


Figura 6.1: El esquema óptico del interferómetro de motas. 1- El típico filtro de interferencia R. 2- Lentes ópticos. 3-Detector (camara CCD). 4- Acumulador de marcos (frames). 5-Computadora. [12]

En el caso de la cámara DRAGON, se registran y almacenan los datos digitalizados, a una velocidad de 25 cuadros/segundo y cuando llega a la capacidad de 1500 cuadros, se transfieren los datos al disco duro.

Para el caso específico de la temporada de 2006 (16 de febrero) se observaron nueve estrellas con separaciones de 0.21 a 1.9 segundos de arco. El *seeing* se estimó en 2 segundos de arco y se hicieron uno o dos juegos de 1000 imágenes para cada estrella; los datos se calibraron con la observación de binarias con una amplia separación y con períodos orbitales muy largos.

En especial se usó STF1311 AB [16] que es una de las estrellas binarias visuales conocidas cuyo período es muy largo. Después de la calibración se determinó que el error en la orientación de la cámara es menor que 2 grados y el error en la escala menor que 1.5 %.

La precisión obtenida para el telescopio de 1 m depende de la separación entre las

estrellas del sistema binario y de la distancia focal efectiva del sistema. La reducción de datos se llevó a cabo eliminando el ruido aditivo de cada imagen. Se anexa un ejemplo de cómo se filtra el ruido en la figura (6.2). En seguida se calculó el espectro de potencias, promediando sobre todas imágenes, ver [5]. La transformada de Fourier de los espectros de potencia (SP) da la función de autocorrelación (FAC). Las distorsiones atmosféricas se eliminan a partir de este espectro utilizando el filtrado de Wiener y por último se mide la distancia entre las estrellas y el ángulo de posición.

Los resultados obtenidos midiendo los parámetros de estas estrellas con el telescopio de 1m del OAN Tonanzintla, usando la cámara DRAGON modificada junto con la reducción de datos con los métodos de interferometría de motas, permitieron demostrar que se pueden medir los parámetros de sistemas binarios con separaciones de $0.15''$ hasta $4''$. El error en la medición del ángulo de posición es $< 2^\circ$ y en la separación $< 0.06''$. Se logra observar estrellas secundarias tan tenues como magnitud 9.

Estos mismos resultados apoyaron la mejora del equipo al instalarle un nuevo intensificador de imagen y enfriador del fotocátodo lo que permitió llegar a una magnitud de 11 para la estrella secundaria y resolver sistemas binarios con una diferencia de magnitudes de hasta 3.



Figura 6.2: La imagen de la izquierda (A) es una imagen de motas antes del procesamiento de datos (raw data). La imagen de la derecha (B) es la imagen de motas después de 1 procesamiento de datos. [12]

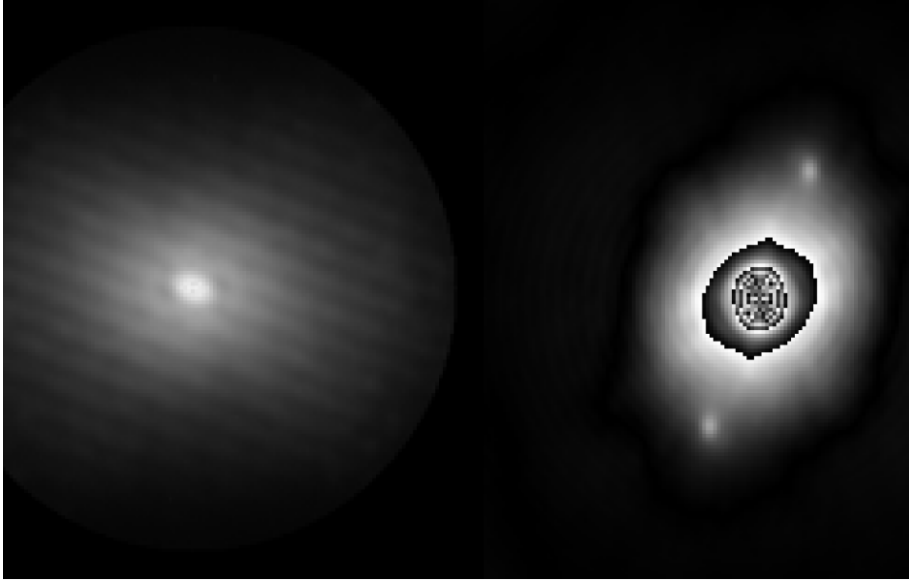


Figura 6.3: Espectro de potencias (PS) (Izquierda) y función de autocorrelación (ACF) (derecha) de ADS 4841. [12]

WDS	ADS	A.P.	Sep.
06149+2230	4841	256.2	1.65
07128+2713	5871	309.2	1.01
07205+0024	5996	171.4	0.68
09020+0240	7152	268.4	1.1
09184+3522	7286	48.1	1.9
10260+0256	7769	297.0	0.21
10279+3642	7780	218.8	0.395
11125-1830	8086	315.7	0.258
11137+2008	8086	315.1	0.55

Tabla 6.1: Resultado de las mediciones en el telescopio de 1-m de Tonantzintla, de los parámetros de varias binarias. El ángulo de posición se expresa en grados con la habitual ambigüedad de 180^0 , la separación en segundos de arco. [12]

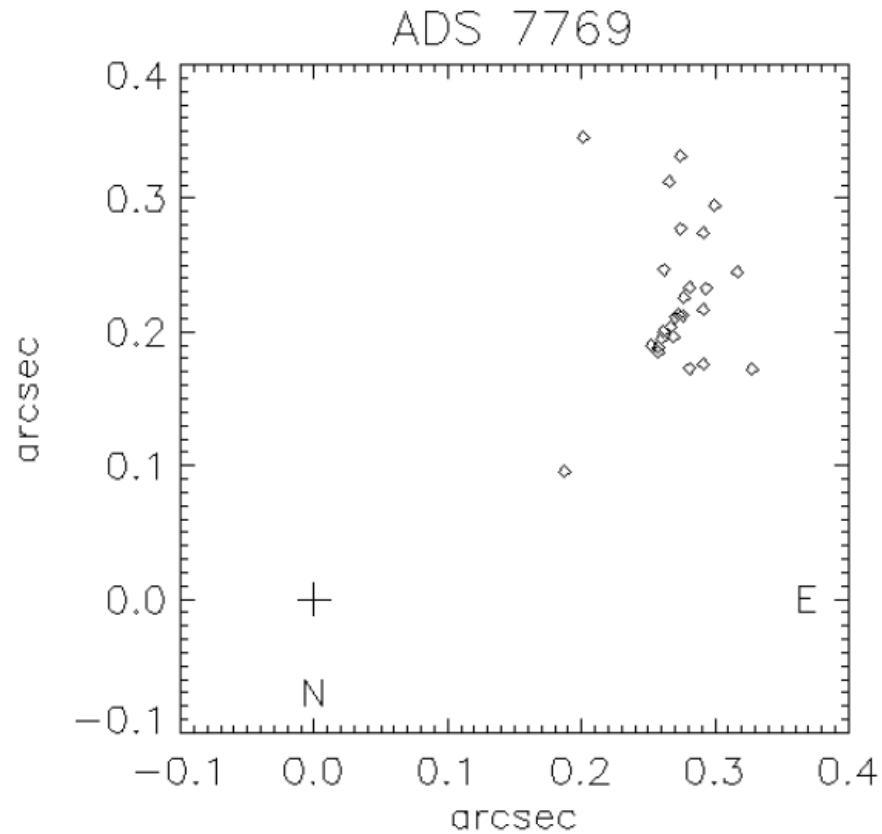


Figura 6.4: Observaciones de ADS 7769. [12]

§6.2. Interferometría de Motas en el OAN. Telescopio de 1m, Tonantzintla, Pue. México.

En 2008 se llevó una nueva temporada de observación con el telescopio de 1 m del OAN Tonantzintla; en esta ocasión se observaron y midieron más de 163 sistemas binarios y múltiples, los cuales presentaban un intervalo en las medidas de la separación que iba de 0,15" a 4,00"; donde la estrella más brillante tenía una magnitud de 9.32.

En esta ocasión el error promedio asociado a la medición de separación fue de 0,03" y en los ángulos de posición de un grado, donde aún se tiene la ambigüedad de 180 grados que en este caso se corrigió comparando con observaciones hechas por otros autores, en especial con el Washington Double Star Catalog (WDS).

El telescopio de 1m situado en Tonantzintla se puede usar efectivamente para mediciones de interferometría de motas de estrellas binarias en el límite de resolución de Rayleigh $R = 1.22\lambda/D$. Para esta temporada de observación se preparó una lista de observación de sistemas binarios visuales del catálogo WDS.

A diferencia de la temporada anterior en esta ocasión se usó el equipo Hamamatsu, que tenía instalado un CCD con intensificador de imagen. Esto no permitía que se tomaran cuadros con resoluciones altas, lo que fijó el tamaño de las imágenes a 352 x 240 px, que combinados con el microscopio daban un campo total de visión de 8.448 x 6.24" todo esto centrado en la banda V (550 nm).

Esta nueva cámara necesitó un nuevo *software* para guardar las imágenes en el disco duro. El *software* se llamó "Tohtli StarCapture"; este software reduce el tamaño final del archivo de video sin perder precisión.

En esta ocasión las observaciones se llevaron a cabo con un *seeing* de entre 3 y 4 segundos de arco, considerado moderado. Para cada estrella binaria se adquirieron 999 imágenes de corta exposición. Esto último se refiere al tamaño en pixeles mencionado anteriormente. En conjunto forman un archivo de 80.5 MB, muy pequeño para la cantidad de información en imágenes que se manejan.

La reducción de imágenes se hizo con el algoritmo de motas estándar, el cual permitió medir los parámetros de estas estrellas. En este caso la calibración mostró que el error en la orientación de la cámara era de un grado y para la escala era de 1.5%. Todo esto siguiendo el método de Labeyrie: calculando el espectro de potencias, eliminando las distorsiones atmosféricas y por último calculando la función de autocorrelación. De este modo se determina el ángulo de posición y la separación angular de las componentes.

Con estos resultados se empezó el programa de observación de estrellas binarias y múltiples usando la técnica de interferometría de motas, la cual nos ha permitido abordar el estudio de las variables separables independientes que se discute a continuación.

Capítulo 7

Interferometría de Motas en los telescopios del OAN-San Pedro Mártir, B.C., México.

§7.1. Interferometría de Motas en el OAN. Telescopio de 1.5m, San Pedro Mártir, B. C., México.

Una vez corroborado el buen funcionamiento de la cámara de motas y los procedimientos de reducción de datos, y que los resultados obtenidos eran comparables con los encontrados en la literatura, se procedió a la siguiente fase: probar el equipo en un sitio con mejor *seeing* y en telescopios más grandes. Esto se concretó en una primera parte usando el telescopio de 1.5m del OAN en la Sierra de San Pedro Mártir, México (SPM) [11] en una primera temporada de observación en junio de 2009. En esta temporada se pudieron resolver los ángulos de posición y/o separación de 144 sistemas.

En las anteriores temporadas en el OAN Tonanzintla, se tenía un *seeing* moderado y aunque éste no interfiere con la resolución que se alcanza con la interferometría de motas si es importante para la magnitud límite de las estrellas que pueden resolverse. Entonces, hay una mejora importante en las estrellas observadas desde los telescopios de SPM, uno de los mejores cielos para la observación astronómica en el mundo.

En específico, para esta temporada se trabajó con el telescopio de 1.5m del OAN SPM utilizando la cámara DRAGON que fue mejorada para poder grabar interferogramas de motas, pero dado que el telescopio de 1.5m no tiene un sistema de óptica activa las aberraciones inducidas por el espejo pesaron mucho más que el hacer observaciones en un

cielo con un *seeing* de a lo más 1 segundo de arco.

Al igual que en las temporadas anteriores se hizo la observación de 40 estrellas binarias de parámetros conocidos para ser usadas como calibradores, con separaciones grandes y períodos largos. En esas mismas noches se midieron 189 estrellas entre binarias y múltiples, con separaciones menores de 1".

El procedimiento de adquisición de imágenes nuevamente consistió en la acumulación de 700 imágenes de corta exposición, que fueron posteriormente procesadas usando el algoritmo de Tokovinin et. al. 2010 que, a diferencia de los anteriores, no necesita una estrella de referencia para calcular los parámetros de las estrellas binarias. La posición de la estrella secundaria se deriva del centro de gravedad de los valores de la función de autocorrelación (FAC) en una región alrededor del valor máximo. Como se sabe, la FAC no tiene información de la fase por lo que el ángulo de posición conserva la ambigüedad de 180°, que se corrige usando también el procedimiento SAA de Christou (1986), aunque este no funciona para objetos débiles.

Esta temporada se resume en la determinación de 175 ángulos de posición θ y separación ρ de 173 estrellas binarias claramente resueltas entre las cuales se incluyen las estrellas usadas para la calibración.

§7.2. Interferometría de Motas en el OAN. Telescopio de 2.1m, San Pedro Mártir, B. C., México.

Para las temporadas de observación de septiembre y octubre de 2009 en el telescopio de 2.1m de OAN SPM, se adquirieron datos para casi 200 sistemas binarios usando la cámara DRAGON descrita anteriormente. La magnitud límite de las estrellas observadas fué $V = 12.3$. Poco menos de la mitad de los sistemas observados tienen separaciones menores que 1", y el error promedio entre separación angular y ángulo de posición fue 0.03" y 1.5°.

Para las noches de observación se estimó un *seeing* menor a 1". Las aberraciones introducidas por el telescopio son de valor similar, por lo que la resolución del telescopio fue de 1.5". Todos los datos se adquirieron con el filtro R . El principal objetivo de estas temporadas fue seleccionar sistemas binarios con movimiento relativo rápido y con ésto obtener candidatos para la determinación de nuevas orbitas.

§7.3. Interferometría de Motas en el OAN. Telescopio de 1.5m y 2.1m, San Pedro Mártir, B. C., México.

En agosto y noviembre de 2010, nuevamente se observó desde el OAN SPM. En esta ocasión en el telescopio de 1.5 m y en el de 2.1 m respectivamente. Esta vez se determinaron los parámetros de 225 estrellas binarias hasta una magnitud límite de $V = 12.2$, para las cuales los errores promedio obtenidos en separación y ángulo de posición fueron respectivamente $0.02''$ y 1.5° . Para estas temporadas de observación se desarrolló un nuevo detector el cual combinó la cámara CCD Water 120N con un intensificador de imagen de tercera generación de 18 mm.

El intensificador de imagen en este caso permitió observaciones en el infrarrojo cercano. También este arreglo es interesante por que toma "medios cuadros" de $1/50$ de segundo; cuando hay buena visibilidad no hay diferencia entre éstos, pero cuando la visibilidad no es tan buena, se tienen que procesar los "medios cuadros" pares e impares por separado. Uno de los logros más representativos de esta temporada de observación fue confirmar 38 estrellas binarias detectadas por primera vez con Hipparcos. Nuevamente la reducción de imágenes se hizo con la técnica de Tokovinin (2010).

La mayor parte de los datos registrados durante estas observaciones de agosto y noviembre de 2010, se obtuvo en condiciones atmosféricas excelentes, usando un filtro R para todas ellas. La adquisición de datos se hizo como ya se describió anteriormente. Los resultados más relevantes son, de hecho, la confirmación de 38 estrellas binarias detectadas anteriormente por Hipparcos. Otro objetivo de esta temporada de observación, fue seleccionar sistemas binarios con movimiento relativo rápido, para poder determinar sus correspondientes órbitas.

Capítulo 8

Descripción del procesamiento de imágenes

§8.1. Muestra de estrellas de Hipparcos

El procesamiento de imágenes consistió en revisar una muestra de 826 estrellas del catálogo Hiparcos observadas en los telescopios de 1m y 1.5m ubicados en Tonantzintla, Puebla y San Pedro Mártir, Baja California, México, respectivamente, del Observatorio Astronómico Nacional (OAN), durante dos temporadas de observación en el año 2009. Ver Tabla.8.1.

Este procesamiento se llevó a cabo con el programa; Tohtli StarCapture program, Orlov et al. (2007),(2009),(2010), desarrollado para las imágenes tomadas con el equipo DRAGON, Voitsekhovich, V. V. et al (2005). [17]. El lenguaje de programación utilizado para las rutinas de procesamiento de las imágenes fue IDL.

§8.2. Posiciones relativas

Las estrellas en un sistema binario se mueven en órbitas elípticas, alrededor del centro de masa del sistema y la órbita relativa entre ellas también es una elipse. La separación, representada en este trabajo como ρ , es una de las dos cantidades que se necesitan para describir completamente la posición relativa de las estrellas dobles o binarias, siendo la otra cantidad el ángulo de posición θ , de acuerdo a la nomenclatura usada en esta tesis.

Si tomamos la estrella más brillante de un sistema binario como el origen de coordenadas rectangulares (x,y) y polares (ρ, θ), la separación ρ , se define como la distancia angular en segundos de arco (") entre las dos estrellas, y el ángulo de posición θ es la posición de la más lejana, desde la más brillante en grados, con el Norte (N) tomado como origen, el Este

(E), a 90 y así sucesivamente. Cuando se usa un telescopio, la visión se invierte (Figura 8.1).

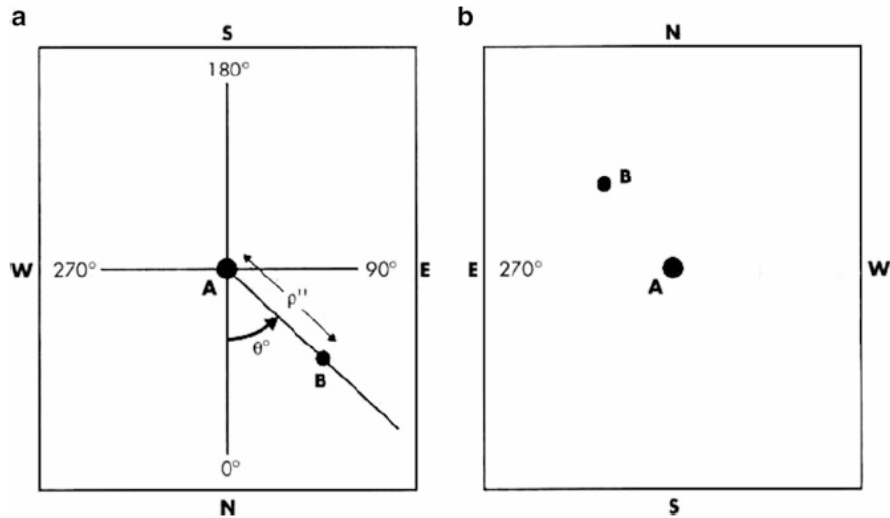


Figura 8.1: Vista del telescopio (izquierda) y vista de binoculares (derecha).

Al observar las estrellas binarias se establecen sus parámetros astrométricos. La separación angular que indicamos con ρ y el ángulo de posición que lo indicamos con θ (Figura 8.2).

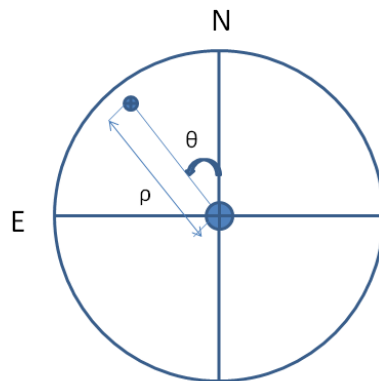


Figura 8.2: Gráfico que muestra las posiciones relativas de un sistema binario, indicando la separación angular ρ y el ángulo de posición θ .

§8.3. Movimiento propio

Entendemos por movimiento propio la variación real de la posición de una estrella en el cielo debido al movimiento relativo entre ella y el Sol. Figura (8.4).



Figura 8.3: Movimiento propio μ de una estrella.

Es una medida del desplazamiento verdadero de la estrella con respecto al Sistema Solar y se produce por la rotación de las estrellas alrededor del centro de nuestra Galaxia. El movimiento propio viene dado por la siguiente expresión:

$$\mu^2 = \mu_\delta^2 + \mu_\alpha^2 \cos^2 \delta, \quad (8.1)$$

donde

$$\mu_\alpha = \alpha_1 - \alpha_2 \quad (8.2)$$

$$\mu_\delta = \delta_1 - \delta_2, \quad (8.3)$$

indican los desplazamientos en ascensión recta (α) y declinación (δ) respectivamente. El factor $\cos^2 \delta$ es debido a que el radio desde el eje de la esfera hasta la superficie varía como $\cos \delta$, siendo igual a 0 en el polo. Figura (8.4).

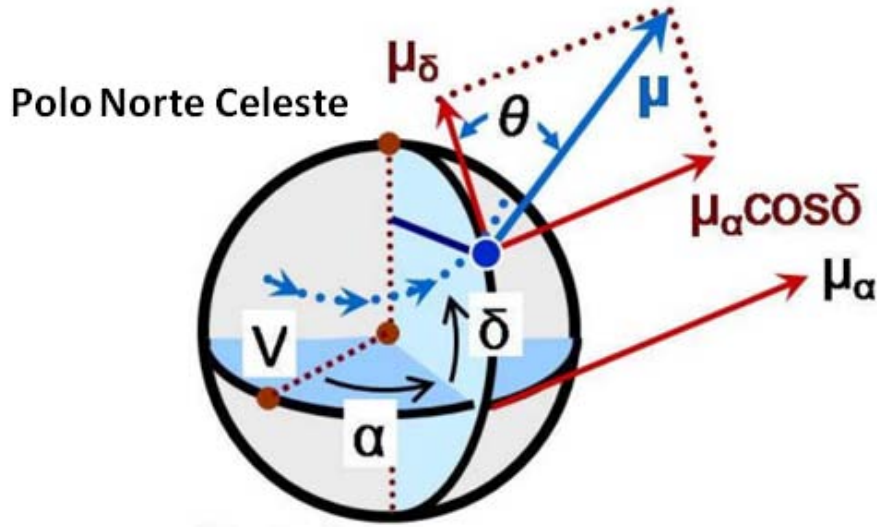


Figura 8.4: Componentes del movimiento propio en la esfera celeste. El Polo Norte celeste, el punto vernal es V, el movimiento propio de la estrella en la esfera celeste viene designado por las flechas. El vector de movimiento propio es μ , α es la ascensión recta, δ es la declinación y θ es el ángulo de posición.

El movimiento propio indica la distancia angular que recorre la estrella en un año y se mide en segundos de arco por año:

$$\mu = \frac{\text{distancia angular}}{\text{tiempo}} = \frac{\text{segundos de arco}}{\text{año}}. \quad (8.4)$$

Se identifica a μ como ρ en las ecuaciones anteriores del movimiento propio y se obtienen las ecuaciones de la astrometría relativa del sistema por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\rho = \sqrt{(\delta_b - \delta_a)^2 + (\alpha_b - \alpha_a)^2 \cos^2 \delta_a} \quad (8.5)$$

$$\theta = \left(\frac{\delta_b - \delta_a}{(\alpha_b - \alpha_a) \cos(\delta_a)} \right). \quad (8.6)$$

ρ y θ son las coordenadas polares del sistema. Para convertirlas en sus correspondientes coordenadas rectangulares (x , y) y así visualizar el desplazamiento relativo de una de las estrellas con respecto a la otra, hacemos uso de las relaciones algebraicas, que nos permiten transformar las coordenadas polares (ρ , θ) a coordenadas rectangulares (x , y) :

$$X = \rho \cos(\theta) \quad (8.7)$$

$$Y = \rho \sin(\theta) \quad (8.8)$$

En las ecuaciones anteriores se debe tomar en cuenta que la separación angular ρ , se debe cambiar por la longitud de arco s , dada en unidades astronómicas (UA), de acuerdo a la expresión algebraíca siguiente:

$$s = r\rho, \tag{8.9}$$

en donde r representa la distancia en unidades astronómicas (UA), que hay entre nosotros, en la Tierra y el sistema binario bajo observación.

Junto con los datos astrométricos que se obtienen, es necesario tener otra información referida a la fecha expresada en años y fracción, normalmente usando tres dígitos en que efectuemos las observaciones. La *época besseliana*, esta basada en el año besseliano de 365.2422 días y se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Época besseliana} = B1900 + (JD - 2415020.31350) / 365.2421987881, \tag{8.10}$$

en donde el prefijo B , nos indica que se trata de la época besseliana. JD^1 , es el día Juliano, la constante 2415020.31352, es el día Juliano correspondiente a la época B1900, que en nuestro calendario corresponde a Enero 0 de 1900 = 31 de diciembre de 1899.

En la siguiente tabla (8.1), se muestran 826 estrellas, en donde r significa que no se resolvió el sistema, W significa que las componentes están muy separadas. Se resolvieron 39 sistemas binarios y aparecen en la tabla con sus respectivas coordenadas rectangulares (X, Y) y polares (ρ , θ). Algunas estrellas aparecen más de una vez porqué se observaron en diferentes horas o días.

§8.4. Lista de 826 estrellas analizadas del catálogo Hipparcos

Día	Hora	HIPPARCOS	[X]: UA	[Y]: UA	$[\rho]$: "	$[\theta]$: °
08/04/2009	22:12	HIP55118	r			
08/04/2009	22:22	HIP56584	r			
08/04/2009	22:30	HIP57300	r			
08/04/2009	22:38	HIP58323	r			
08/04/2009	22:43	HIP58777	r			

Continúa en la página siguiente.

¹El día Juliano fue introducido como una constante astronómica en 1984 y está basado en la longitud del año Juliano 365.25 días y se calcula como $JD = J2000 + (JD - 2451545) / 365.25$. El prefijo J, indica que se trata de época Juliana y la constante es el día Juliano para la época J2000.

Día	Hora	HIPPARCOS	[X]: UA	[Y]: UA	$[\rho]$: "	$[\theta]$: °
08/04/2009	22:47	HIP59262	r			
08/04/2009	22:51	HIP59527	r			
08/04/2009	22:56	HIP59824	r			
08/04/2009	23:07	HIP59833	r			
08/04/2009	23:12	HIP61435	r			
08/04/2009	23:16	HIP61779	r			
08/04/2009	23:19	HIP62194	r			
08/04/2009	23:23	HIP62504	r			
08/04/2009	23:26	HIP62603	r			
08/04/2009	23:29	HIP62927	r			
08/04/2009	23:32	HIP63622	r			
08/04/2009	23:36	HIP63978	r			
08/04/2009	23:39	HIP64028	r			
08/04/2009	23:42	HIP64293	r			
08/04/2009	23:46	HIP64461	r			
08/04/2009	23:49	HIP64747	r			
08/04/2009	23:53	HIP64928	r			
08/04/2009	23:57	HIP64956	r			
09/04/2009	00:00	HIP65049	r			
09/04/2009	00:04	HIP65227	r			
09/04/2009	00:08	HIP66327	r			
09/04/2009	00:13	HIP66945	r			
09/04/2009	00:17	HIP66969	r			
09/04/2009	00:21	HIP67749	r			
09/04/2009	00:24	HIP68771	r			
09/04/2009	00:31	HIP69062	W			
09/04/2009	00:35	HIP69238	r			
09/04/2009	00:39	HIP69434	r			
09/04/2009	00:44	HIP69695	r			
09/04/2009	00:47	HIP69878	r			
09/04/2009	00:51	HIP69888	r			
09/04/2009	00:55	HIP70003	r			
09/04/2009	00:58	HIP70127	r			
09/04/2009	01:02	HIP70235	r			
09/04/2009	01:05	HIP70749	r			
09/04/2009	01:09	HIP71230	r			

Continúa en la página siguiente.

§8.4. LISTA DE 826 ESTRELLAS ANALIZADAS DEL CATÁLOGO
HIPPARCOS

75

Día	Hora	HIPPARCOS	[X]: UA	[Y]: UA	$[\rho]$: "	$[\theta]$: °
09/04/2009	01:12	HIP71268	r			
09/04/2009	01:17	HIP71889	r			
09/04/2009	01:20	HIP72393	r			
09/04/2009	01:24	HIP72515	r			
09/04/2009	01:28	HIP72951	r			
09/04/2009	01:31	HIP73053	r			
09/04/2009	01:35	HIP73282	r			
09/04/2009	01:38	HIP73561	r			
09/04/2009	01:42	HIP73657	r			
09/04/2009	01:47	HIP74158	r			
09/04/2009	01:50	HIP74211	r			
09/04/2009	01:57	HIP74487	r			
09/04/2009	02:01	HIP77950	r			
09/04/2009	02:05	HIP78679	r			
09/04/2009	02:09	HIP78680	r			
09/04/2009	02:12	HIP78859	r			
09/04/2009	02:16	HIP79677	r			
09/04/2009	02:20	HIP79701	r			
09/04/2009	02:24	HIP79759	r			
09/04/2009	02:29	HIP79819	r			
09/04/2009	02:33	HIP80568	r			
09/04/2009	02:37	HIP80806	r			
09/04/2009	02:41	HIP80807	r			
09/04/2009	02:45	HIP80808	r			
09/04/2009	02:49	HIP80838	r			
09/04/2009	02:54	HIP81591	r			
09/04/2009	02:58	HIP82003	r			
09/04/2009	03:02	HIP82039	r			
09/04/2009	03:05	HIP83064	r			
09/04/2009	03:08	HIP83245	r			
09/04/2009	03:12	HIP83279	r			
09/04/2009	03:16	HIP83333	r			
09/04/2009	03:19	HIP83385	r			
09/04/2009	03:23	HIP84196	r			
09/04/2009	03:28	HIP84254	r			
09/04/2009	03:31	HIP85209	r			

Continúa en la página siguiente.

Día	Hora	HIPPARCOS	[X]: UA	[Y]: UA	$[\rho]$: "	$[\theta]$: °
09/04/2009	03:34	HIP85303	r			
09/04/2009	03:39	HIP85371	134	82.333	46.93409	173.8845
09/04/2009	03:42	HIP85556	r			
09/04/2009	03:46	HIP85706	r			
09/04/2009	03:50	HIP86068	r			
09/04/2009	03:54	HIP87231	r			
09/04/2009	03:57	HIP87309	67.044	103.213	67.10824	-112.598
09/04/2009	04:01	HIP87331	r			
09/04/2009	04:04	HIP87349	r			
09/04/2009	04:08	HIP88407	r			
09/04/2009	04:12	HIP88638	r			
09/04/2009	04:16	HIP89033	r			
09/04/2009	04:20	HIP89237	116.08	134.814	14.16789	-65.7723
09/04/2009	04:23	HIP89418	r			
09/04/2009	22:34	HIP44230	r			
09/04/2009	22:42	HIP46809	r			
09/04/2009	22:49	HIP47739	r			
09/04/2009	22:53	HIP47764	r			
09/04/2009	23:13	HIP48492	r			
10/04/2009	00:08	HIP59648	r			
10/04/2009	00:13	HIP60023	r			
10/04/2009	01:14	HIP60094	r			
10/04/2009	01:19	HIP61920	r			
10/04/2009	02:11	HIP63434	r			
10/04/2009	01:24	HIP63919	r			
10/04/2009	01:28	HIP64104	W			
10/04/2009	01:33	HIP64368	r			
10/04/2009	02:18	HIP64420	r			
10/04/2009	02:23	HIP64922	r			
10/04/2009	01:38	HIP65042	r			
10/04/2009	01:42	HIP65114	r			
10/04/2009	01:47	HIP65318	r			
10/04/2009	01:53	HIP65458	r			
10/04/2009	02:29	HIP65461	r			
10/04/2009	01:57	HIP65473	r			
10/04/2009	03:00	HIP65753	r			

Continúa en la página siguiente.

§8.4. LISTA DE 826 ESTRELLAS ANALIZADAS DEL CATÁLOGO
HIPPARCOS

77

Día	Hora	HIPPARCOS	[X]: UA	[Y]: UA	$[\rho]$: "	$[\theta]$: °
10/04/2009	03:05	HIP65764	r			
10/04/2009	03:12	HIP65947	r			
10/04/2009	02:01	HIP66053	r			
10/04/2009	02:07	HIP66715	r			
10/04/2009	03:18	HIP67327	r			
10/04/2009	02:35	HIP67631	r			
10/04/2009	02:40	HIP67790	r			
10/04/2009	03:22	HIP68046	r			
10/04/2009	02:44	HIP68252	r			
10/04/2009	02:50	HIP68433	r			
10/04/2009	03:28	HIP68512	r			
10/04/2009	02:54	HIP68645	r			
10/04/2009	03:32	HIP73286	r			
10/04/2009	03:38	HIP73422	r			
10/04/2009	03:43	HIP73934	r			
10/04/2009	03:50	HIP74069	r			
10/04/2009	04:05	HIP74382	r			
10/04/2009	04:10	HIP76381	r			
10/04/2009	04:15	HIP76802	r			
10/04/2009	04:19	HIP77091	r			
10/04/2009	04:24	HIP77488	r			
10/04/2009	04:28	HIP78363	r			
10/04/2009	04:33	HIP78913	r			
10/04/2009	04:37	HIP78982	r			
10/04/2009	04:42	HIP78986	r			
10/04/2009	04:46	HIP79088	W			
10/04/2009	04:51	HIP79186	r			
10/04/2009	04:58	HIP79448	122.12	132.765	7.842807	-61.3108
10/04/2009	05:05	HIP80861	r			
10/04/2009	05:09	HIP81210	r			
11/04/2009	21:22	HIP40942trend1	W			
11/04/2009	21:26	HIP40942trend2	W			
11/04/2009	21:30	HIP40942trend3	W			
11/04/2009	21:34	HIP40942trend4	W			
11/04/2009	21:39	HIP41962	r			
11/04/2009	21:44	HIP42391	r			

Continúa en la página siguiente.

Día	Hora	HIPPARCOS	[X]: UA	[Y]: UA	$[\rho]$: "	$[\theta]$: °
11/04/2009	21:49	HIP42589	r			
11/04/2009	21:53	HIP42826	r			
11/04/2009	21:59	HIP43752	r			
11/04/2009	22:03	HIP44117	r			
11/04/2009	22:07	HIP44230	r			
11/04/2009	22:11	HIP45329	r			
11/04/2009	22:18	HIP45438	r			
11/04/2009	22:22	HIP46022	r			
11/04/2009	22:26	HIP46250	r			
11/04/2009	22:31	HIP46302	r			
11/04/2009	22:37	HIP46809	r			
11/04/2009	22:41	HIP47739	r			
11/04/2009	22:46	HIP48492	r			
11/04/2009	22:50	HIP48520	r			
11/04/2009	22:55	HIP48798	r			
11/04/2009	22:59	HIP48997	r			
11/04/2009	23:03	HIP49088	r			
11/04/2009	23:08	HIP49419	r			
11/04/2009	23:12	HIP50007	r			
11/04/2009	23:16	HIP50059	r			
11/04/2009	23:20	HIP50192	r			
11/04/2009	23:25	HIP51033	r			
11/04/2009	23:29	HIP51320	r			
11/04/2009	23:33	HIP51606	r			
11/04/2009	23:38	HIP51758	r			
11/04/2009	23:42	HIP51877	r			
11/04/2009	23:46	HIP53305	r			
11/04/2009	23:50	HIP53333	r			
11/04/2009	23:54	HIP53525	r			
11/04/2009	23:58	HIP53606	r			
12/04/2009	00:03	HIP53884	r			
12/04/2009	00:07	HIP55015	r			
12/04/2009	00:11	HIP55471	r			
12/04/2009	00:16	HIP55559	r			
12/04/2009	00:20	HIP55663	r			
12/04/2009	00:24	HIP55939	r			

Continúa en la página siguiente.

§8.4. LISTA DE 826 ESTRELLAS ANALIZADAS DEL CATÁLOGO
HIPPARCOS

Día	Hora	HIPPARCOS	[X]: UA	[Y]: UA	[ρ]: "	[θ]: °
12/04/2009	00:29	HIP56486	r			
12/04/2009	00:38	HIP56533	r			
12/04/2009	00:44	HIP56671	r			
12/04/2009	00:49	HIP57128	r			
12/04/2009	00:54	HIP58149	r			
12/04/2009	00:58	HIP59471	r			
12/04/2009	01:03	HIP59540	120.279	150.9	23.57257	-21.7134
12/04/2009	01:08	HIP59915	r			
12/04/2009	01:14	HIP60860	r			
12/04/2009	01:18	HIP61039	r			
12/04/2009	01:22	HIP61073	r			
12/04/2009	01:31	HIP61459	r			
12/04/2009	01:36	HIP62654	r			
12/04/2009	01:41	HIP63919	r			
12/04/2009	01:45	HIP64104	W			
12/04/2009	01:50	HIP64368	r			
12/04/2009	01:54	HIP64420	r			
12/04/2009	01:59	HIP64469	r			
12/04/2009	02:04	HIP64833	W			
12/04/2009	02:08	HIP65042	r			
12/04/2009	02:13	HIP65114	r			
12/04/2009	02:17	HIP65458	r			
12/04/2009	02:22	HIP65461	r			
12/04/2009	02:26	HIP65473	r			
12/04/2009	02:31	HIP65753	r			
12/04/2009	02:34	HIP65764	r			
12/04/2009	02:38	HIP66971	r			
12/04/2009	02:42	HIP67269	r			
12/04/2009	02:46	HIP67327	r			
12/04/2009	02:51	HIP67446	r			
12/04/2009	02:55	HIP68512	r			
12/04/2009	03:00	HIP68645	r			
12/04/2009	03:05	HIP68851	r			
12/04/2009	03:09	HIP69106	r			
12/04/2009	03:14	HIP69566	r			
12/04/2009	03:18	HIP70331	r			

Continúa en la página siguiente.

Día	Hora	HIPPARCOS	[X]: UA	[Y]: UA	$[\rho]$: "	$[\theta]$: °
12/04/2009	03:22	HIP70500	r			
12/04/2009	03:26	HIP70746	r			
12/04/2009	03:30	HIP71012	r			
12/04/2009	03:35	HIP71049	r			
12/04/2009	03:40	HIP71839	r			
12/04/2009	03:44	HIP72495	r			
12/04/2009	03:48	HIP72945	r			
12/04/2009	03:53	HIP73034	r			
12/04/2009	03:57	HIP73472	r			
12/04/2009	04:02	HIP76381	r			
12/04/2009	04:08	HIP76802	r			
12/04/2009	04:13	HIP77488	r			
12/04/2009	04:17	HIP78363	r			
12/04/2009	04:22	HIP78913	r			
12/04/2009	04:28	HIP78982	r			
12/04/2009	04:32	HIP78986	r			
12/04/2009	04:37	HIP79088	r			
12/04/2009	04:43	HIP79186	r			
12/04/2009	21:45	HIP40782	r			
12/04/2009	21:49	HIP42750	r			
12/04/2009	21:54	HIP42763	r			
12/04/2009	21:58	HIP44244	r			
12/04/2009	22:02	HIP44986	r			
12/04/2009	22:07	HIP45112	r			
12/04/2009	22:11	HIP45258	r			
12/04/2009	22:15	HIP45405	r			
12/04/2009	22:20	HIP46393	r			
12/04/2009	22:24	HIP46753	r			
12/04/2009	22:28	HIP47170	r			
12/04/2009	22:32	HIP47477	r			
12/04/2009	22:37	HIP47806	r			
12/04/2009	22:41	HIP48373	r			
12/04/2009	22:45	HIP48407	r			
12/04/2009	22:49	HIP48968	r			
12/04/2009	22:53	HIP49157	r			
12/04/2009	22:58	HIP49232	r			

Continúa en la página siguiente.

§8.4. LISTA DE 826 ESTRELLAS ANALIZADAS DEL CATÁLOGO
HIPPARCOS

81

Día	Hora	HIPPARCOS	[X]: UA	[Y]: UA	[ρ]: "	[θ]: °
12/04/2009	23:03	HIP49621	r			
12/04/2009	23:09	HIP49854	r			
12/04/2009	23:14	HIP50506	r			
12/04/2009	23:19	HIP50968	r			
12/04/2009	23:23	HIP51342	r			
12/04/2009	23:28	HIP51921	r			
12/04/2009	23:32	HIP52214	r			
12/04/2009	23:36	HIP52579	r			
12/04/2009	23:41	HIP52853	r			
12/04/2009	23:45	HIP53120	r			
12/04/2009	23:50	HIP53852	r			
12/04/2009	23:54	HIP54011	r			
12/04/2009	23:58	HIP54426	r			
13/04/2009	00:03	HIP54666	r			
13/04/2009	00:07	HIP55089	r			
13/04/2009	00:11	HIP55191	r			
13/04/2009	00:16	HIP55558	r			
13/04/2009	00:21	HIP56052	r			
13/04/2009	00:33	HIP56533	r			
13/04/2009	00:44	HIP56533SUP2	r			
13/04/2009	00:58	HIP59220	r			
13/04/2009	01:02	HIP59375	r			
13/04/2009	01:06	HIP59776	r			
13/04/2009	01:11	HIP60094	r			
13/04/2009	00:54	HIP60437	r			
13/04/2009	01:15	HIP60495	r			
13/04/2009	00:49	HIP60698	r			
13/04/2009	01:19	HIP60903	r			
13/04/2009	01:25	HIP61210	r			
13/04/2009	01:30	HIP61614	r			
13/04/2009	01:36	HIP62018	212.333	108.167	85.89763	104.0361
13/04/2009	01:40	HIP62620	r			
13/04/2009	01:44	HIP62828	r			
13/04/2009	01:48	HIP63135	r			
13/04/2009	01:53	HIP63511	r			
13/04/2009	01:57	HIP63845	r			

Continúa en la página siguiente.

Día	Hora	HIPPARCOS	[X]: UA	[Y]: UA	$[\rho]$: "	$[\theta]$: °
13/04/2009	02:02	HIP64245	r			
13/04/2009	02:06	HIP64533	r			
13/04/2009	02:11	HIP65128	r			
13/04/2009	02:15	HIP65318	r			
13/04/2009	02:19	HIP65622	r			
13/04/2009	02:24	HIP66044	r			
13/04/2009	02:28	HIP66411	r			
13/04/2009	02:32	HIP66760	r			
13/04/2009	02:36	HIP67041	r			
13/04/2009	02:40	HIP67475	r			
13/04/2009	02:45	HIP67840	r			
13/04/2009	02:49	HIP68147	149.233	123.418	20.98888	105.4234
13/04/2009	02:53	HIP68519	r			
13/04/2009	02:58	HIP68927	r			
13/04/2009	03:03	HIP69193	r			
13/04/2009	03:08	HIP69533	r			
13/04/2009	03:13	HIP69822	r			
13/04/2009	03:17	HIP70664	r			
13/04/2009	03:21	HIP70950	r			
13/04/2009	03:26	HIP71291	r			
13/04/2009	03:31	HIP71554	r			
13/04/2009	03:35	HIP72175	r			
13/04/2009	03:40	HIP72440	r			
13/04/2009	03:44	HIP72795	r			
13/04/2009	03:48	HIP73079	r			
13/04/2009	03:52	HIP73431	r			
13/04/2009	03:57	HIP73793	151.885	114.488	27.09836	122.3799
13/04/2009	04:01	HIP74135	r			
13/04/2009	04:07	HIP74512	r			
13/04/2009	04:12	HIP75059	r			
13/04/2009	04:16	HIP75588	r			
13/04/2009	04:20	HIP75757	r			
13/04/2009	04:25	HIP76130	r			
13/04/2009	04:29	HIP76588	r			
13/04/2009	04:33	HIP76938	r			
13/04/2009	04:37	HIP77299	r			

Continúa en la página siguiente.

§8.4. LISTA DE 826 ESTRELLAS ANALIZADAS DEL CATÁLOGO
HIPPARCOS

83

Día	Hora	HIPPARCOS	[X]: UA	[Y]: UA	$[\rho]$: "	$[\theta]$: °
13/04/2009	04:41	HIP77583	r			
13/04/2009	04:46	HIP77877	r			
13/04/2009	04:50	HIP78161	r			
13/04/2009	04:54	HIP78538	r			
13/04/2009	04:58	HIP78638	r			
13/04/2009	05:03	HIP78768	r			
13/04/2009	05:08	HIP79381	r			
13/04/2009	05:13	HIP80417	r			
13/04/2009	05:18	HIP80590	r			
13/04/2009	05:22	HIP83140	r			
13/04/2009	05:26	HIP83791	r			
13/04/2009	05:31	HIP84049	r			
13/04/2009	05:36	HIP84102	131.326	122.077	7.303301	161.4286
05/05/2009	22:38	HIP56533	r			
05/05/2009	22:44	HIP56533s1	r			
05/05/2009	22:48	HIP56768	W			
05/05/2009	22:54	HIP56805	r			
05/05/2009	22:59	HIP56959	r			
05/05/2009	23:04	HIP57125	r			
05/05/2009	23:11	HIP57169	r			
05/05/2009	23:16	HIP57206	r			
05/05/2009	23:25	HIP58190	r			
05/05/2009	23:31	HIP58261	150.768	150.099	30.31524	45.89411
05/05/2009	23:35	HIP58281	r			
05/05/2009	23:40	HIP58386	r			
05/05/2009	23:44	HIP60242	r			
05/05/2009	23:48	HIP60314	r			
05/05/2009	23:53	HIP60529	r			
05/05/2009	23:58	HIP60605	r			
06/05/2009	00:03	HIP61800	r			
06/05/2009	00:07	HIP62124	r			
06/05/2009	00:12	HIP62148	r			
06/05/2009	00:16	HIP62899	r			
06/05/2009	00:21	HIP62911	r			
06/05/2009	00:25	HIP63620	r			
06/05/2009	00:29	HIP64083	r			

Continúa en la página siguiente.

Día	Hora	HIPPARCOS	[X]: UA	[Y]: UA	$[\rho]$: "	$[\theta]$: °
06/05/2009	00:34	HIP64139	r			
06/05/2009	00:40	HIP64358	r			
06/05/2009	00:45	HIP65170	r			
06/05/2009	00:49	HIP65484	r			
06/05/2009	00:54	HIP65666	r			
06/05/2009	00:58	HIP65676	144.629	113.37	22.10345	135.0018
06/05/2009	01:04	HIP65812	r			
06/05/2009	01:08	HIP65913	r			
06/05/2009	01:13	HIP67268	r			
06/05/2009	01:18	HIP67276	r			
06/05/2009	01:22	HIP68046	r			
06/05/2009	01:27	HIP68408	r			
06/05/2009	01:31	HIP68797	r			
06/05/2009	01:36	HIP69166	r			
06/05/2009	01:41	HIP69534	r			
06/05/2009	01:45	HIP69565	r			
06/05/2009	01:50	HIP70334	r			
06/05/2009	01:56	HIP70341	r			
06/05/2009	02:01	HIP70712	161.639	76.222	62.05499	148.2665
06/05/2009	02:05	HIP70990	r			
06/05/2009	02:10	HIP71081	r			
06/05/2009	02:15	HIP72792	r			
06/05/2009	02:19	HIP72932	r			
06/05/2009	02:24	HIP73048	r			
06/05/2009	02:29	HIP73158	r			
06/05/2009	02:34	HIP73186	r			
06/05/2009	02:39	HIP73918	r			
06/05/2009	02:44	HIP74569	r			
06/05/2009	02:48	HIP75157	r			
06/05/2009	02:52	HIP75246	r			
06/05/2009	02:55	HIP75268	r			
06/05/2009	02:59	HIP76330	r			
06/05/2009	03:03	HIP76347	r			
06/05/2009	03:08	HIP76777	r			
06/05/2009	03:13	HIP76819	r			
06/05/2009	03:16	HIP77245	r			

Continúa en la página siguiente.

§8.4. LISTA DE 826 ESTRELLAS ANALIZADAS DEL CATÁLOGO
HIPPARCOS

Día	Hora	HIPPARCOS	[X]: UA	[Y]: UA	$[\rho]$: "	$[\theta]$: °
06/05/2009	03:21	HIP77991	r			
06/05/2009	03:25	HIP78214	r			
06/05/2009	03:29	HIP78348	r			
06/05/2009	03:33	HIP78576	r			
06/05/2009	03:37	HIP78666	r			
06/05/2009	03:40	HIP79068	r			
06/05/2009	03:46	HIP79353	r			
06/05/2009	03:49	HIP80434	r			
06/05/2009	03:53	HIP80515	r			
06/05/2009	03:57	HIP81116	r			
06/05/2009	04:02	HIP81147	r			
06/05/2009	04:06	HIP81196	r			
06/05/2009	04:11	HIP81975S	r			
06/05/2009	04:16	HIP81979	159.811	153.782	39.54068	51.18948
06/05/2009	04:20	HIP82226	r			
06/05/2009	04:24	HIP82751	r			
06/05/2009	04:29	HIP83512	r			
06/05/2009	04:33	HIP83899	r			
06/05/2009	04:37	HIP83909	r			
06/05/2009	04:41	HIP84415	r			
06/05/2009	04:46	HIP86904	r			
06/05/2009	04:50	HIP87323	158.417	148.29	35.17761	56.74541
06/05/2009	04:54	HIP87634	r			
06/05/2009	04:58	HIP87647	r			
06/05/2009	05:02	HIP87748	W			
06/05/2009	05:07	HIP88751	r			
06/05/2009	05:12	HIP89318	r			
06/05/2009	05:16	HIP89603	W			
06/05/2009	05:20	HIP89818	r			
06/05/2009	05:24	HIP90525	r			
06/05/2009	05:28	HIP90809	r			
06/05/2009	05:33	HIP90980	r			
06/05/2009	05:37	HIP91658	r			
06/05/2009	05:40	HIP92093	r			
06/05/2009	05:45	HIP92313	r			
06/05/2009	05:48	HIP92539	r			

Continúa en la página siguiente.

Día	Hora	HIPPARCOS	[X]: UA	[Y]: UA	$[\rho]$: "	$[\theta]$: °
06/05/2009	05:52	HIP92606	r			
06/05/2009	05:58	HIP92613	r			
06/05/2009	06:02	HIP92861	r			
06/05/2009	06:06	HIP92906	r			
06/05/2009	06:10	HIP93730	r			
06/05/2009	06:14	HIP94170	r			
06/05/2009	21:22	HIP50800	r			
06/05/2009	21:27	HIP50830	r			
06/05/2009	21:31	HIP50837	r			
06/05/2009	21:35	HIP51022	r			
06/05/2009	21:40	HIP51030	152.148	155.62	35.27682	41.0093
06/05/2009	21:48	HIP51361	r			
06/05/2009	21:52	HIP51471	r			
06/05/2009	21:55	HIP51637	r			
06/05/2009	21:59	HIP51917	r			
06/05/2009	22:03	HIP51951	r			
06/05/2009	22:07	HIP52609	r			
06/05/2009	22:11	HIP52691	r			
06/05/2009	22:17	HIP52725	r			
06/05/2009	22:21	HIP53641	W			
06/05/2009	22:25	HIP54198	r			
06/05/2009	22:30	HIP54270	r			
06/05/2009	22:34	HIP54471	r			
06/05/2009	22:38	HIP55154	r			
06/05/2009	22:42	HIP55613	r			
06/05/2009	22:48	HIP55872	r			
06/05/2009	23:02	HIP56516	155.122	126.589	26.23303	95.27333
06/05/2009	22:52	HIP56533s1	r			
06/05/2009	22:57	HIP56533s2	r			
06/05/2009	23:06	HIP57245	W			
06/05/2009	23:10	HIP57608	r			
06/05/2009	23:15	HIP57612	r			
06/05/2009	23:19	HIP58405	r			
06/05/2009	23:23	HIP58683	r			
06/05/2009	23:27	HIP58685	r			
06/05/2009	23:32	HIP59444	r			

Continúa en la página siguiente.

§8.4. LISTA DE 826 ESTRELLAS ANALIZADAS DEL CATÁLOGO
HIPPARCOS

Día	Hora	HIPPARCOS	[X]: UA	[Y]: UA	$[\rho]$: "	$[\theta]$: °
06/05/2009	23:36	HIP59667	r			
06/05/2009	23:56	HIP61433	r			
07/05/2009	00:00	HIP61519	r			
06/05/2009	23:40	HIP61644	r			
06/05/2009	23:44	HIP61920	r			
06/05/2009	23:48	HIP63015	r			
06/05/2009	23:51	HIP63317	r			
07/05/2009	00:04	HIP64508	r			
07/05/2009	00:09	HIP65231	r			
07/05/2009	00:13	HIP65633	r			
07/05/2009	00:17	HIP66107	r			
07/05/2009	00:22	HIP66213	r			
07/05/2009	00:26	HIP66715	r			
07/05/2009	00:31	HIP66863	r			
07/05/2009	00:36	HIP67106	r			
07/05/2009	00:40	HIP67249	r			
07/05/2009	00:43	HIP67790	r			
07/05/2009	00:47	HIP68032	r			
07/05/2009	00:51	HIP68252	r			
07/05/2009	00:55	HIP68261	r			
07/05/2009	01:00	HIP68420	r			
07/05/2009	01:03	HIP69253	r			
07/05/2009	01:15	HIP69520	r			
07/05/2009	01:19	HIP69677	r			
07/05/2009	01:07	HIP69740	r			
07/05/2009	01:11	HIP70190	r			
07/05/2009	01:23	HIP70274	r			
07/05/2009	01:27	HIP70684	r			
07/05/2009	01:31	HIP70885	r			
07/05/2009	01:35	HIP70885s2	r			
07/05/2009	01:40	HIP71000	r			
07/05/2009	01:44	HIP71138	r			
07/05/2009	01:47	HIP71354	r			
07/05/2009	01:51	HIP73554	r			
07/05/2009	01:55	HIP73934	r			
07/05/2009	01:59	HIP73961	r			

Continúa en la página siguiente.

Día	Hora	HIPPARCOS	[X]: UA	[Y]: UA	$[\rho]$: "	$[\theta]$: °
07/05/2009	02:03	HIP74069	r			
07/05/2009	02:07	HIP74173	r			
07/05/2009	02:11	HIP74396	r			
07/05/2009	02:15	HIP74922	r			
07/05/2009	02:19	HIP75698	r			
07/05/2009	02:23	HIP75908	r			
07/05/2009	02:26	HIP76459	r			
07/05/2009	02:30	HIP77222	r			
07/05/2009	02:34	HIP77431	r			
07/05/2009	02:38	HIP79518	r			
07/05/2009	02:42	HIP80393	r			
07/05/2009	02:47	HIP80572	r			
07/05/2009	02:51	HIP81241	r			
07/05/2009	02:55	HIP81786	r			
07/05/2009	03:05	HIP81954	r			
07/05/2009	03:10	HIP81967	r			
07/05/2009	02:59	HIP81975	r			
07/05/2009	03:14	HIP82139	r			
07/05/2009	03:18	HIP82343	r			
07/05/2009	03:21	HIP82356	r			
07/05/2009	03:26	HIP82801	r			
07/05/2009	03:29	HIP83167	r			
07/05/2009	03:33	HIP83800	r			
07/05/2009	03:37	HIP84100	r			
07/05/2009	03:41	HIP84283	r			
07/05/2009	03:45	HIP84562	r			
07/05/2009	03:48	HIP84849	r			
07/05/2009	03:55	HIP85137	r			
07/05/2009	03:59	HIP85280	r			
07/05/2009	04:02	HIP85546	r			
07/05/2009	04:06	HIP85785	r			
07/05/2009	04:10	HIP87506	r			
07/05/2009	04:14	HIP87680	r			
07/05/2009	04:18	HIP87743	r			
07/05/2009	04:22	HIP87906	r			
07/05/2009	05:15	HIP87971	r			

Continúa en la página siguiente.

§8.4. LISTA DE 826 ESTRELLAS ANALIZADAS DEL CATÁLOGO
HIPPARCOS

89

Día	Hora	HIPPARCOS	[X]: UA	[Y]: UA	$[\rho]$: "	$[\theta]$: °
07/05/2009	05:09	HIP88243	r			
07/05/2009	04:27	HIP89390	r			
07/05/2009	05:05	HIP89528	r			
07/05/2009	04:31	HIP89870	r			
07/05/2009	04:34	HIP90114	r			
07/05/2009	04:38	HIP90399	r			
07/05/2009	04:42	HIP90649	r			
07/05/2009	04:46	HIP90702	r			
07/05/2009	04:50	HIP91423	r			
07/05/2009	04:57	HIP92216	r			
07/05/2009	05:01	HIP92338	r			
11/05/2009	21:09	HIP49308	r			
11/05/2009	21:13	HIP49826	r			
11/05/2009	21:18	HIP50472	145.879	145.879	23.87051	45
11/05/2009	21:22	HIP50830	r			
11/05/2009	21:27	HIP51269	W			
11/05/2009	21:33	HIP51413	r			
11/05/2009	21:37	HIP51637	r			
11/05/2009	21:42	HIP52359	r			
11/05/2009	21:47	HIP52423	r			
11/05/2009	21:51	HIP52517	r			
11/05/2009	21:55	HIP53326	r			
11/05/2009	22:00	HIP53641	W			
11/05/2009	22:04	HIP53903	r			
11/05/2009	22:08	HIP54376	r			
11/05/2009	22:12	HIP54832	r			
11/05/2009	22:18	HIP54996	r			
11/05/2009	22:27	HIP55508	r			
11/05/2009	22:23	HIP55509	r			
11/05/2009	22:31	HIP56516	155.122	126.187	26.27303	96.14633
11/05/2009	22:36	HIP56768	W			
11/05/2009	22:40	HIP57090	r			
11/05/2009	22:44	HIP57245	197.287	98.907	74.62374	113.7823
11/05/2009	22:48	HIP57624	153.306	75.528	58.73701	155.5556
11/05/2009	22:53	HIP57788	r			
11/05/2009	22:57	HIP58261	150.768	150.21	30.3926	45.74385

Continúa en la página siguiente.

Día	Hora	HIPPARCOS	[X]: UA	[Y]: UA	$[\rho]$: "	$[\theta]$: °
11/05/2009	23:01	HIP58796	r			
11/05/2009	23:06	HIP58961	r			
11/05/2009	23:10	HIP59444	r			
11/05/2009	23:15	HIP59667	r			
11/05/2009	23:19	HIP60201	198.444	157.356	75.01021	67.78838
11/05/2009	23:23	HIP60412	r			
11/05/2009	23:27	HIP61036	r			
11/05/2009	23:33	HIP61272			182.4335	-135
11/05/2009	23:37	HIP61364	r			
11/05/2009	23:41	HIP62018	211.755	108.167	85.337	104.1302
11/05/2009	23:45	HIP62124	r			
11/05/2009	23:50	HIP62548	r			
11/05/2009	23:54	HIP62910	r			
11/05/2009	23:58	HIP63317	r			
12/05/2009	00:02	HIP63322	r			
12/05/2009	00:07	HIP64104	W			
12/05/2009	00:11	HIP64232	W			
12/05/2009	00:16	HIP64833	W			
12/05/2009	00:20	HIP65227	r			
12/05/2009	00:26	HIP65299	r			
12/05/2009	00:30	HIP65937	W			
12/05/2009	00:34	HIP66239	122.972	184.459	55.78564	-6.20329
12/05/2009	00:40	HIP66569	r			
12/05/2009	00:44	HIP66937	r			
12/05/2009	00:49	HIP66946	r			
12/05/2009	00:53	HIP68069	W			
12/05/2009	00:57	HIP68126	r			
12/05/2009	01:01	HIP68771	r			
12/05/2009	01:05	HIP68841	r			
12/05/2009	01:10	HIP69304	142.396	105.557	27.0005	150.2551
12/05/2009	01:14	HIP69437	r			
12/05/2009	01:18	HIP69742	r			
12/05/2009	01:23	HIP69907	130.211	141.786	12.84322	5.410513
12/05/2009	01:27	HIP70712	161.954	76.756	61.76894	147.7575
12/05/2009	01:32	HIP71097	r			
12/05/2009	01:36	HIP71100	r			

Continúa en la página siguiente.

§8.4. LISTA DE 826 ESTRELLAS ANALIZADAS DEL CATÁLOGO
HIPPARCOS

91

Día	Hora	HIPPARCOS	[X]: UA	[Y]: UA	$[\rho]$: "	$[\theta]$: °
12/05/2009	01:40	HIP72007	189.684	118.149	61.64651	100.138
12/05/2009	01:45	HIP72222	r			
12/05/2009	01:48	HIP72463	152.257	142.024	26.65544	60.75102
12/05/2009	01:53	HIP73053	r			
12/05/2009	01:57	HIP73186	r			
12/05/2009	02:04	HIP73472	r			
12/05/2009	02:08	HIP74158	r			
12/05/2009	02:13	HIP74512	r			
12/05/2009	02:17	HIP74643	r			
12/05/2009	02:21	HIP74937	r			
12/05/2009	02:26	HIP75632	W			
12/05/2009	02:31	HIP75720	W			
12/05/2009	02:36	HIP76242	134.358	167.848	39.21575	7.852814
12/05/2009	02:40	HIP76667	139.466	139.853	15.07729	43.96003
12/05/2009	02:44	HIP77245	148.071	130.163	19.10643	86.51027
12/04/2009	21:45	HIP40782	r			
12/04/2009	21:49	HIP42750	r			
12/04/2009	21:54	HIP42763	r			
12/04/2009	21:58	HIP44244	r			
12/04/2009	22:02	HIP44986	r			
12/04/2009	22:07	HIP45112	r			
12/04/2009	22:11	HIP45258	r			
12/04/2009	22:15	HIP45405	r			
12/04/2009	22:20	HIP46393	r			
12/04/2009	22:24	HIP46753	r			
12/04/2009	22:28	HIP47170	r			
12/04/2009	22:32	HIP47477	r			
12/04/2009	22:37	HIP47806	r			
12/04/2009	22:41	HIP48373	r			
12/04/2009	22:45	HIP48407	r			
12/04/2009	22:49	HIP48968	r			
12/04/2009	22:53	HIP49157	r			
12/04/2009	22:58	HIP49232	r			
12/04/2009	23:03	HIP49621	r			
12/04/2009	23:09	HIP49854	r			
12/04/2009	23:14	HIP50506	r			

Continúa en la página siguiente.

Día	Hora	HIPPARCOS	[X]: UA	[Y]: UA	$[\rho]$: "	$[\theta]$: °
12/04/2009	23:19	HIP50968	r			
12/04/2009	23:23	HIP51342	r			
12/04/2009	23:28	HIP51921	r			
12/04/2009	23:32	HIP52214	r			
12/04/2009	23:36	HIP52579	r			
12/04/2009	23:41	HIP52853	r			
12/04/2009	23:45	HIP53120	r			
12/04/2009	23:50	HIP53852	r			
12/04/2009	23:54	HIP54011	r			
12/04/2009	23:58	HIP54426	r			
13/04/2009	00:03	HIP54666	r			
13/04/2009	00:07	HIP55089	r			
13/04/2009	00:11	HIP55191	r			
13/04/2009	00:16	HIP55558	r			
13/04/2009	00:21	HIP56052	r			
13/04/2009	00:33	HIP56533	r			
13/04/2009	00:44	HIP56533SUP2	r			
13/04/2009	00:58	HIP59220	r			
13/04/2009	01:02	HIP59375	r			
13/04/2009	01:06	HIP59776	r			
13/04/2009	01:11	HIP60094	r			
13/04/2009	00:54	HIP60437	r			
13/04/2009	01:15	HIP60495	r			
13/04/2009	00:49	HIP60698	r			
13/04/2009	01:19	HIP60903	r			
13/04/2009	01:25	HIP61210	r			
13/04/2009	01:30	HIP61614	r			
13/04/2009	01:36	HIP62018	212.333	108.167	85.89763	104.0361
13/04/2009	01:40	HIP62620	r			
13/04/2009	01:44	HIP62828	r			
13/04/2009	01:48	HIP63135	r			
13/04/2009	01:53	HIP63511	r			
13/04/2009	01:57	HIP63845	r			
13/04/2009	02:02	HIP64245	r			
13/04/2009	02:06	HIP64533	r			
13/04/2009	02:11	HIP65128	r			

Continúa en la página siguiente.

§8.4. LISTA DE 826 ESTRELLAS ANALIZADAS DEL CATÁLOGO
HIPPARCOS

Día	Hora	HIPPARCOS	[X]: UA	[Y]: UA	$[\rho]$: "	$[\theta]$: °
13/04/2009	02:15	HIP65318	r			
13/04/2009	02:19	HIP65622	r			
13/04/2009	02:24	HIP66044	r			
13/04/2009	02:28	HIP66411	r			
13/04/2009	02:32	HIP66760	r			
13/04/2009	02:36	HIP67041	r			
13/04/2009	02:40	HIP67475	r			
13/04/2009	02:45	HIP67840	r			
13/04/2009	02:49	HIP68147	149.233	123.418	20.98888	105.4234
13/04/2009	02:53	HIP68519	r			
13/04/2009	02:58	HIP68927	r			
13/04/2009	03:03	HIP69193	r			
13/04/2009	03:08	HIP69533	r			
13/04/2009	03:13	HIP69822	r			
13/04/2009	03:17	HIP70664	r			
13/04/2009	03:21	HIP70950	r			
13/04/2009	03:26	HIP71291	r			
13/04/2009	03:31	HIP71554	r			
13/04/2009	03:35	HIP72175	r			
13/04/2009	03:40	HIP72440	r			
13/04/2009	03:44	HIP72795	r			
13/04/2009	03:48	HIP73079	r			
13/04/2009	03:52	HIP73431	r			
13/04/2009	03:57	HIP73793	151.885	114.488	27.09836	122.3799
13/04/2009	04:01	HIP74135	r			
13/04/2009	04:07	HIP74512	r			
13/04/2009	04:12	HIP75059	r			
13/04/2009	04:16	HIP75588	r			
13/04/2009	04:20	HIP75757	r			
13/04/2009	04:25	HIP76130	r			
13/04/2009	04:29	HIP76588	r			
13/04/2009	04:33	HIP76938	r			
13/04/2009	04:37	HIP77299	r			
13/04/2009	04:41	HIP77583	r			
13/04/2009	04:46	HIP77877	r			
13/04/2009	04:50	HIP78161	r			

Continúa en la página siguiente.

Día	Hora	HIPPARCOS	[X]: UA	[Y]: UA	$[\rho]: ''$	$[\theta]: ^\circ$
13/04/2009	04:54	HIP78538	r			
13/04/2009	04:58	HIP78638	r			
13/04/2009	05:03	HIP78768	r			
13/04/2009	05:08	HIP79381	r			
13/04/2009	05:13	HIP80417	r			
13/04/2009	05:18	HIP80590	r			
13/04/2009	05:22	HIP83140	r			
13/04/2009	05:26	HIP83791	r			
13/04/2009	05:31	HIP84049	r			
13/04/2009	05:36	HIP84102	131.326	122.077	7.303301	161.4286
08/05/2009	22:47	HIP51759	r			
08/05/2009	22:51	HIP52354	r			
08/05/2009	22:55	HIP52600	136.558	140.241	13.54561	33.91531
08/05/2009	22:59	HIP52974	r			
08/05/2009	23:03	HIP53216	r			
08/05/2009	23:07	HIP53563	r			
08/05/2009	23:11	HIP54037	r			
08/05/2009	23:16	HIP54119	r			
08/05/2009	23:20	HIP54702	r			
08/05/2009	23:24	HIP54832	r			
08/05/2009	23:29	HIP55172	r			
08/05/2009	23:38	HIP55508	r			
08/05/2009	23:34	HIP55509	r			
08/05/2009	23:43	HIP56471	r			
08/05/2009	23:47	HIP56670	r			
08/05/2009	23:51	HIP57075	r			
08/05/2009	23:55	HIP57314	r			
08/05/2009	23:59	HIP57970	r			
09/05/2009	00:03	HIP58052	r			
09/05/2009	00:06	HIP58561	r			
09/05/2009	00:11	HIP58776	r			
09/05/2009	00:15	HIP59212	r			
09/05/2009	00:19	HIP59244	r			
09/05/2009	00:23	HIP59765	r			
09/05/2009	00:29	HIP59904	r			
09/05/2009	00:33	HIP59994	r			

Continúa en la página siguiente.

§8.4. LISTA DE 826 ESTRELLAS ANALIZADAS DEL CATÁLOGO
HIPPARCOS

Día	Hora	HIPPARCOS	[X]: UA	[Y]: UA	[ρ]: "	[θ]: °
09/05/2009	00:37	HIP60681	r			
09/05/2009	00:40	HIP61314	r			
09/05/2009	00:44	HIP61430	r			
09/05/2009	00:48	HIP61678	r			
09/05/2009	00:53	HIP62104	r			
09/05/2009	00:59	HIP62648	r			
09/05/2009	02:07	HIP67716	r			
09/05/2009	02:11	HIP68327	r			
09/05/2009	02:15	HIP68543	r			
09/05/2009	02:19	HIP69293	r			
09/05/2009	02:22	HIP69745	r			
09/05/2009	02:26	HIP69907	129.969	141.985	13.02111	4.267762
09/05/2009	02:30	HIP70353	r			
09/05/2009	02:35	HIP70490	r			
09/05/2009	02:38	HIP70951	r			
09/05/2009	02:42	HIP71460	r			
09/05/2009	02:46	HIP71756	r			
09/05/2009	02:50	HIP72007	189.951	118.618	61.82888	99.66662
09/05/2009	02:54	HIP72214	r			
09/05/2009	02:58	HIP72628	r			
09/05/2009	03:02	HIP72892	r			
09/05/2009	03:06	HIP73240	r			
09/05/2009	03:10	HIP73681	r			
09/05/2009	03:14	HIP74009	r			
09/05/2009	03:18	HIP74351	r			
09/05/2009	03:22	HIP74693	r			
09/05/2009	03:27	HIP74968	r			
09/05/2009	03:31	HIP75326	r			
09/05/2009	03:35	HIP75720	W			
09/05/2009	03:39	HIP76027	r			
09/05/2009	03:43	HIP76460	r			
09/05/2009	03:48	HIP76643	r			
09/05/2009	03:52	HIP77216	r			
09/05/2009	03:56	HIP77402	r			
09/05/2009	04:00	HIP77767	r			
09/05/2009	04:04	HIP78050	r			

Continúa en la página siguiente.

Día	Hora	HIPPARCOS	[X]: UA	[Y]: UA	$[\rho]$: "	$[\theta]$: °
09/05/2009	04:08	HIP78344	r			
09/05/2009	04:12	HIP78751	r			
09/05/2009	04:15	HIP79105	r			
09/05/2009	04:19	HIP79239	r			
09/05/2009	04:25	HIP79719	r			
09/05/2009	04:29	HIP80147	r			
09/05/2009	04:33	HIP80705	r			
09/05/2009	04:37	HIP80866	r			
09/05/2009	04:42	HIP86588	r			
09/05/2009	04:46	HIP87037	r			
09/05/2009	04:51	HIP87313	191.5	187.449	85.57182	46.91832
09/05/2009	04:55	HIP87526	r			
09/05/2009	04:58	HIP88037	r			
09/05/2009	05:02	HIP88427	r			
09/05/2009	05:07	HIP89411	r			
09/05/2009	05:11	HIP89645	r			
09/05/2009	05:14	HIP89762	r			
09/05/2009	05:18	HIP90063	r			
09/05/2009	05:23	HIP90196	r			
09/05/2009	05:27	HIP90533	r			
09/05/2009	05:31	HIP90708	r			
09/05/2009	05:35	HIP91351	r			
09/05/2009	05:39	HIP91485	r			
08/05/2009	22:16	HIP55821	r			
08/05/2009	22:20	HIP56410	r			
08/05/2009	22:24	HIP56533	r			
08/05/2009	22:28	HIP56533S2	r			
08/05/2009	22:33	HIP56533S3	r			
08/05/2009	22:42	HIP56784	r			
09/05/2009	01:14	HIP70885S1	r			
09/05/2009	01:19	HIP70885S2	r			
09/05/2009	01:24	HIP70885S3	r			
09/05/2009	01:04	HIP70892	r			
09/05/2009	01:10	HIP71168	r			
09/05/2009	01:28	HIP71644S1	r			
09/05/2009	01:32	HIP71644S2	r			

Continúa en la página siguiente.

Día	Hora	HIPPARCOS	[X]: UA	[Y]: UA	$[\rho]$: "	$[\theta]$: °
09/05/2009	01:36	HIP71644S3	r			
09/05/2009	01:40	HIP71802S1	r			
09/05/2009	01:44	HIP71802S2	r			
09/05/2009	01:49	HIP72124	r			
09/05/2009	01:55	HIP72469	r			
09/05/2009	02:03	HIP73068	r			

Tabla 8.1: Lista de los 826 sistemas del catálogo Hipparcos analizados con el software del equipo DRAGON, incluyendo notaciones r,w,y,x generadas después del primer y segundo procesamiento.

§8.5. Primer procesamiento

El procesamiento en este caso se hace usando la rutina que etiquetamos como "WinerFilter3.pro" de IDL, Figura [8.5]. Lo que se observa como resultado en la imagen, son las componentes del sistema resueltas, en el caso que el proceso lo haya logrado. De ser así se puede leer directamente en la ventana (Figura [8.6]), las coordenadas y y x .

Los archivos que se generan son dos y les dimos la nomenclatura HIP00000ACFOut.fit (Función de autocorrelación) y HIP00000PSFOut.fit (Espectro de potencias). Los sistemas que no se resolvieron los marcamos con r , los que si se resolvieron, registramos sus coordenadas y y x . En los casos en que las componentes estuvieron muy separadas se marcaron con W . Tabla (8.1).

§8.6. Segundo procesamiento

En este procesamiento se corre la rutina IDL, "RhoFiTok.pro", La cual toma como alimentación los datos del archivo list1.txt, como en la rutina anterior. Figura (8.7).


```

pro WinerFilter3
  flnmpsf='
  nw=256
  PstR=dblarr(nw,nw)
  PstO=dblarr(nw,nw)
  close,4
  openr,4,'listR.txt'
  readf,4,flnmpsf
  WHILE flnmpsf ne '' DO BEGIN
    PstR1=readfits(flmpsf+'PSF256.fits')
    PstR=PstR+PstR1
    readf,4,flnmpsf
  ENDWHILE
  PstR=PstR/100
  Wkssi=intarr(nw,nw)
  xkssi=dblarr(nw,nw)
  appod=dblarr(nw,nw)
  filter=dblarr(nw,nw)
  area=dblarr(Nw,Nw)

  Maximum=max(PstR)
  snr=Maximum/double(1000000000000000.)
  filter=winerpsf(Nw,PstR,snr)
  PstOut=dblarr(Nw,Nw)
  r=70
  Cyt=In Nw r Area

```

Figura 8.5: Rutina "WinerFilter3.pro"IDL. [12]

```

pro RhoFiTok
  ;it is working well
  COMMON PolarRhoFi, Rho.Phi
  flnmpsf='
  nw=256
  PstIn=dblarr(nw,nw)
  PstO=dblarr(nw,nw)
  Bias=dblarr(nw,nw)
  FBias=complexarr(nw,nw)
  liniaX= dblarr(nw)
  liniaY= dblarr(nw)
  appod=dblarr(nw,nw)
  area = dblarr(nw,nw)
  RhoNx = dblarr(nw,nw)
  PhiNx = dblarr(nw,nw)
  Polar.Nw.Nw, RhoNx.PhiNx
  Pst2 = dblarr(nw,nw)

  close,4
  openr,4,'ListRhoFi.txt'
  readf,4,flnmpsf
  readf,4,flnmpsf

  close,2
  openw,2,'Resultat.txt'
  WHILE flnmpsf ne '' DO BEGIN
    Result = STRSPFIT(flnmpsf,STRNG(9b))

```

Figura 8.7: Rutina ".acfdragnw2.pro"IDL. [12]

En este segundo procesamiento, lo que obtenemos como resultado son imágenes en donde se observan las líneas características de un patrón de interferencia. Figura (8.8). En este caso los archivos generados tienen una extensión "PSF256.fits".

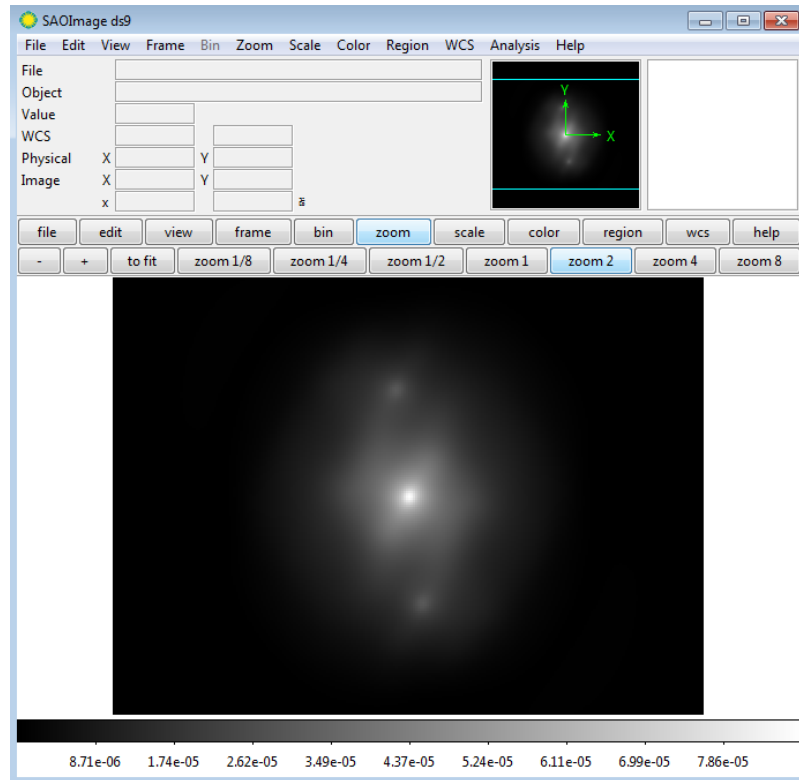


Figura 8.6: Imagen procesada por Fig.8.5 para resolver el sistema y leer las componentes y y x del sistema HIP85371

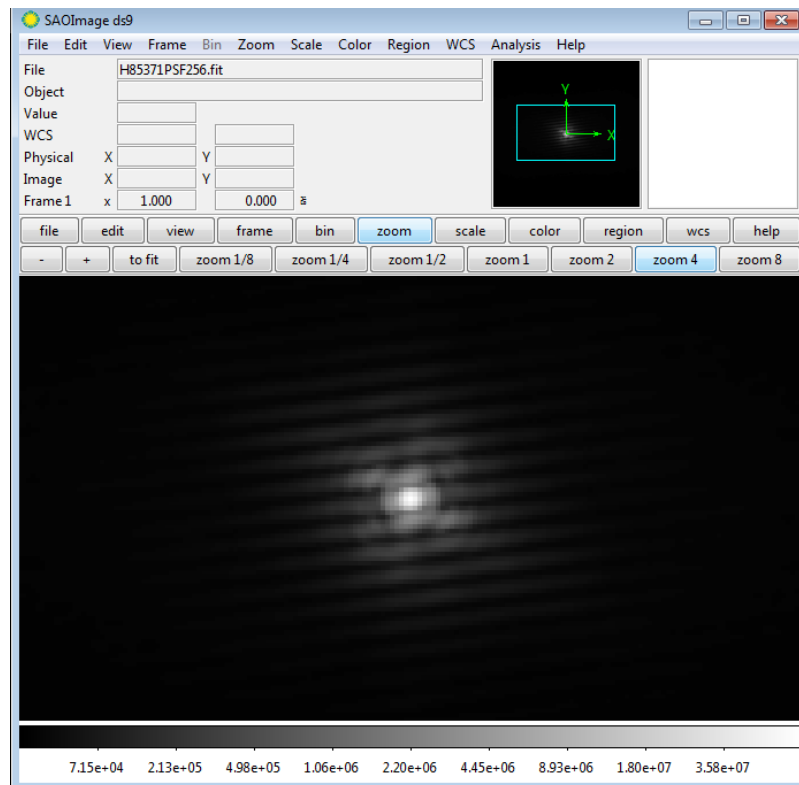


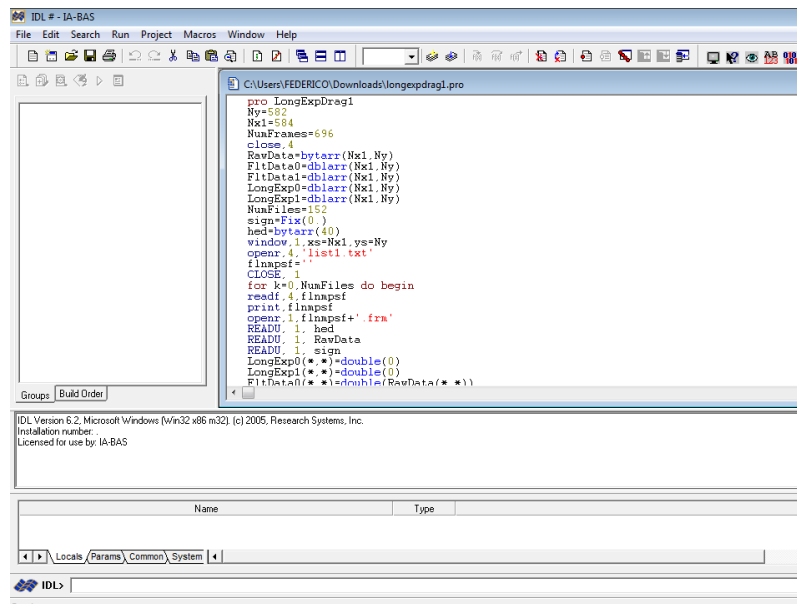
Figura 8.8: Patrón de interferencia de la imagen procesada por Figura (8.7) del sistema HIP85371

Los sistemas que no presentan líneas bien definidas se marcan como sistemas de referencia (nr), para procesarlos con otra rutina de programación IDL.: ”acfdragonw2.pro”. Vease la Figura (8.11).

§8.7. Tercer procesamiento

El procesamiento consiste en la rutina ”longexpdrag1.pro”soportada por IDL, la cual genera archivos de extensión Long0.fit., alimentándose del archivo list1.txt (Figura 8.9), en donde aparecen las 826 estrellas de Hipparcos observadas y grabadas por el equipo DRAGON.

En estos archivos, lo que se obtiene como resultado del procesamiento es un sistema resuelto con las componentes estelares separadas mostrando la imagen característica de motas. Vease la Figura (8.10).



```

IDL # - IA-BAS
File Edit Search Run Project Macros Window Help
C:\Users\FEDERICO\Downloads\longexpdrag1.pro
pro LongExpDrag1
Ny=582
Nxi=584
NumFrames=696
close, 4
RawData=bytarr(Nxi, Ny)
FitData0=dblarr(Nxi, Ny)
FitData1=dblarr(Nxi, Ny)
LongExp0=dblarr(Nxi, Ny)
LongExp1=dblarr(Nxi, Ny)
NumFiles=152
sign=fix(0.)
hed=bytarr(40)
window, 1, xs=Nxi, ys=Ny
openr, 4, 'list1.txt'
fInapsf=
CLOSE, 1
for k=0, NumFiles do begin
readf, 4, fInapsf
print, fInapsf
openr, 1, fInapsf+ '.frm'
READU, 1, hed
READU, 1, RawData
READU, 1, sign
LongExp0(*, *) = double(0)
LongExp1(*, *) = double(0)
FitData0(*, *) = double(RawData(*, *))

```

IDL# Version 6.2, Microsoft Windows (Win32 x86 m32), (c) 2005, Research Systems, Inc.
Installation number:
Licensed for use by: IA-BAS

Name	Type
C:\Users\FEDERICO\Downloads\longexpdrag1.pro	

IDL#

Figura 8.9: Rutina longexpdrag1.pro IDL. [12]

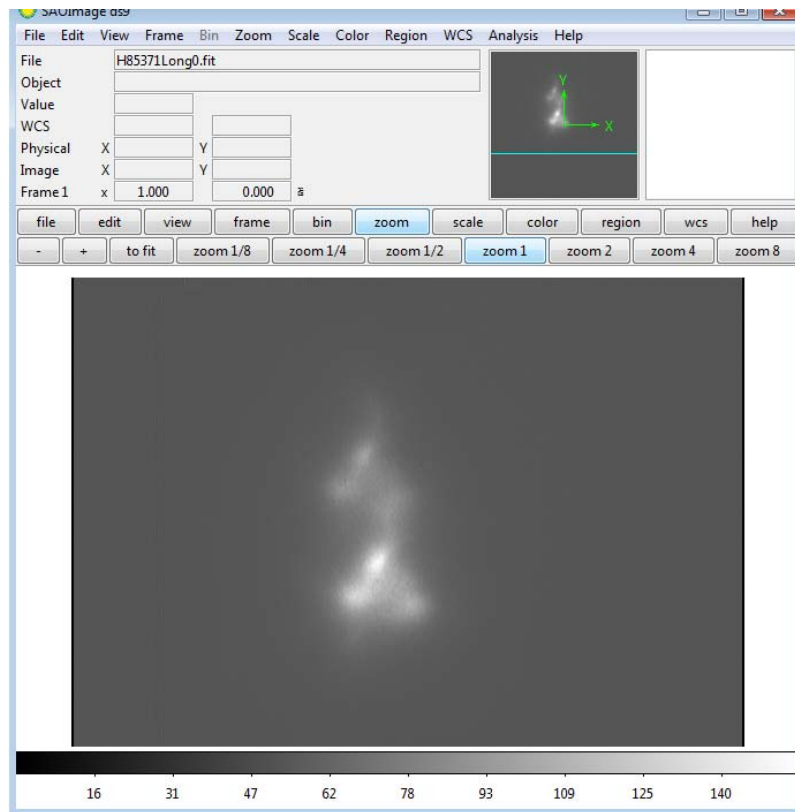


Figura 8.10: Imagen del sistema resuelto, procesada por Fig.8.9 del sistema HIP85371

§8.8. Cuarto procesamiento

Los sistemas marcados con nr de la Tabla (8.1), los procesamos con la rutina "acfdragonw2.pro", Vease la Figura (8.11), generando archivos cuya nomenclatura es "HIP00000Long1.fit". En estas imágenes, Figura (8.12), podemos observar, para los sistemas resueltos, una imagen de mayor resolución de los sistemas que no se pudieron resolver con la rutina RhoFiTok.pro" (ver la Figura.(8.11)).

```

Centred=dblarr(Nx, Ny)
ImgData=dblarr(Nx, Ny)
Inagin=dblarr(Nx, Ny)
x=(findgen(Nx)-Nx/2)
y=(findgen(Ny)-Ny/2)
xn=dblarr(Nx, Ny)
yn=dblarr(Nx, Ny)
for k=0, Ny-1 do begin
  xn(*,k)=double(x(*))
endfor
for k=0, Nx-1 do begin
  yn(k,*)=double(y(*))
endfor
NumFiles=152
signal=fix(0)
hed=bytarr(40)
close_4
openr_4, 'list1.txt'
finput= ''
close_1
for k=0, NumFiles do begin
  readi_4, finput
  print, finput
  fits_read, finput+ 'Long0.fit', Inagin
  linea=dblarr(Nx)
  FOR i=0, Nx-1 DO BEGIN
  
```

Figura 8.11: Rutina "WinerFilter3.pro" IDL. [12]

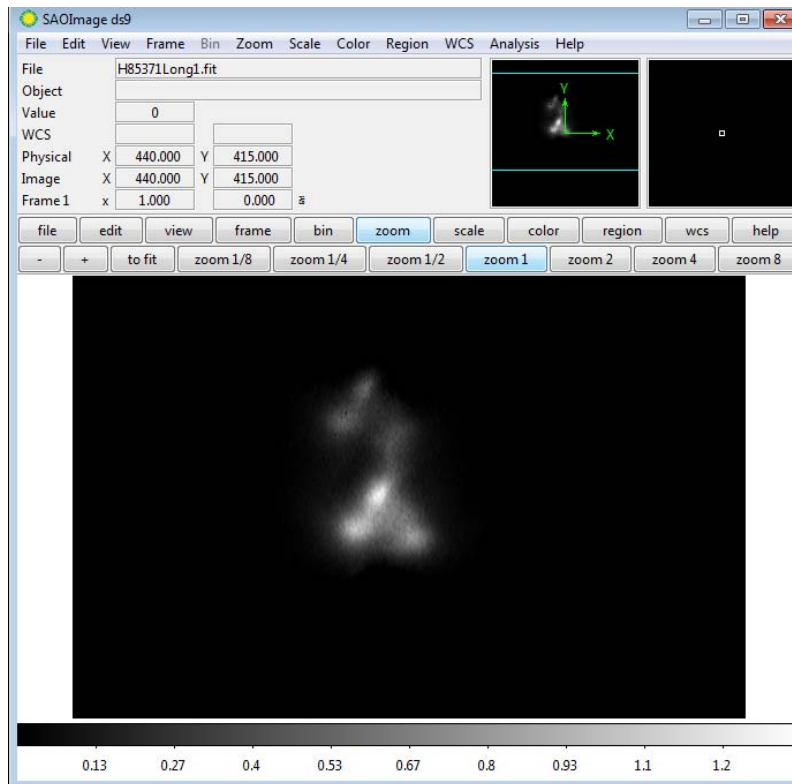


Figura 8.12: Imagen de mas alto contraste, procesada por Fig.8.11 del sistema HIP85371

Capítulo 9

Resultados y conclusiones.

§9.1. Resultados

Después del procesamiento de las imágenes captadas por el equipo DRAGON y analizadas con las rutinas antes descritas, se encontró que de las 826 estrellas, 39 son sistemas binarios. Ver Tabla (9.1), que incluye algunas estrellas observadas más de una vez.

Hipparcos	WDS	Descubridor	Día	Hora	θ	ρ
HIP50472	10184+3730	HU 875	11/05/2009	21:18	72	1.200369
HIP51030	10255+3647	HU 877	06/05/2009	21:40	69	1.773955
HIP52600	10454+3831	HO 532	08/05/2009	22:55	61	0.681164
HIP56516	11352+3524	HU 887	06/05/2009	23:02	125	1.319173
HIP56516	11352+3524	HU 887	11/05/2009	22:31	125	1.321184
HIP57245	11443+3900	STF1569	11/05/2009	22:44	142	3.752582
HIP57624	11489+3342	KU 40	11/05/2009	22:48	184	2.953691
HIP58261	11569+4021	STF1586	05/05/2009	23:31	75	1.524454
HIP58261	11569+4021	STF1586	11/05/2009	22:57	75	1.528344
HIP59540	12126+3546	STF1613	12/04/2009	01:03	7	1.185387
HIP60201	12207+3500	HO 536	11/05/2009	23:19	97	3.772017
HIP62018	12427+3349	STF1672	13/04/2009	01:36	133	4.319509
HIP62018	12427+3349	STF1672	11/05/2009	23:41	133	4.291317
HIP62018	12427+3349	STF1672	13/04/2009	01:36	133	4.319509
HIP65676	13280+3235	A 1856	06/05/2009	00:58	165	1.111510
HIP66239	13346+3308	BU 933	12/05/2009	00:34	22	2.805276
HIP68147	13571+3426	BU 937	13/04/2009	02:49	135	1.055462
HIP68147	13571+3426	BU 937	13/04/2009	02:49	135	1.055462

Continúa en la página siguiente.

Hipparcos	WDS	Descubridor	Día	Hora	θ	ρ
HIP69304	14111+3628	HU 1264	12/05/2009	01:10	180	1.357766
HIP69907	14184+3412	HU 901	12/05/2009	01:23	36	0.645843
HIP69907	14184+3412	HU 901	09/05/2009	02:26	36	0.654789
HIP70712	14278+3257	STF1848	06/05/2009	02:01	178	3.120541
HIP70712	14278+3257	STF1848	12/05/2009	01:27	178	3.106157
HIP72007	14436+3745	STF1875	12/05/2009	01:40	129	3.100000
HIP72007	14436+3745	STF1875	09/05/2009	02:50	129	3.109171
HIP73793	15049+3428	STF1908	13/04/2009	03:57	151	1.362688
HIP76242	15344+3201	HU 746	12/05/2009	02:36	38	1.972031
HIP76667	15394+3331	COU 800	12/05/2009	02:40	72	0.758187
HIP77245	15464+3627	STF1973	12/05/2009	02:44	141	0.960799
HIP79448	16128+3922	STF2028	10/04/2009	04:58	-35	0.394389
HIP81979	16448+3544	STF2097	06/05/2009	04:16	79	1.988371
HIP84102	17116+3916	HU 1178	13/04/2009	05:36	190	0.367259
HIP84102	17116+3916	HU 1178	13/04/2009	05:36	190	0.367259
HIP85371	17266+3546	STF2168	09/04/2009	03:39	201	2.360161
HIP87309	17504+3526	STF2236	09/04/2009	03:57	-83	3.374652
HIP87313	17505+4112	A 698	09/05/2009	04:51	76	4.303125
HIP87323	17506+3932	COU1301	06/05/2009	04:50	86	1.768966
HIP89237	18126+3836	BU 1091	09/04/2009	04:20	-41	0.712456
HIP72463			12/05/2009	01:48	60.751	1.340414

Tabla 9.1: Lista de 39 sistemas binarios de Hipparcos confirmados. El sistema HIP72463, en negritas, no aparece en el catálogo WDS, pero si aparece en Simbad y en el catálogo de Hipparcos.

Los 39 sistemas dobles del catálogo HIPPARCOS, que se enlistan en la Tabla ([9.1], se buscaron en el catálogo de estrellas dobles de Washington (WDS, por sus siglas en idioma inglés), encontrando que el sistema etiquetado como HIP72463, no tiene clasificación, por lo tanto se puede actualizar el catálogo WDS.

De acuerdo a los resultados registrados en la Tabla (9.1), la separación; ρ , de las componentes es de 1.3" (segundos de arco) y el ángulo de posición; θ , es de 60.7⁰ (grados) para este sistema. Las imágenes de este sistema se muestran en las Figuras (9.1), (9.2), (9.3) y (9.4).

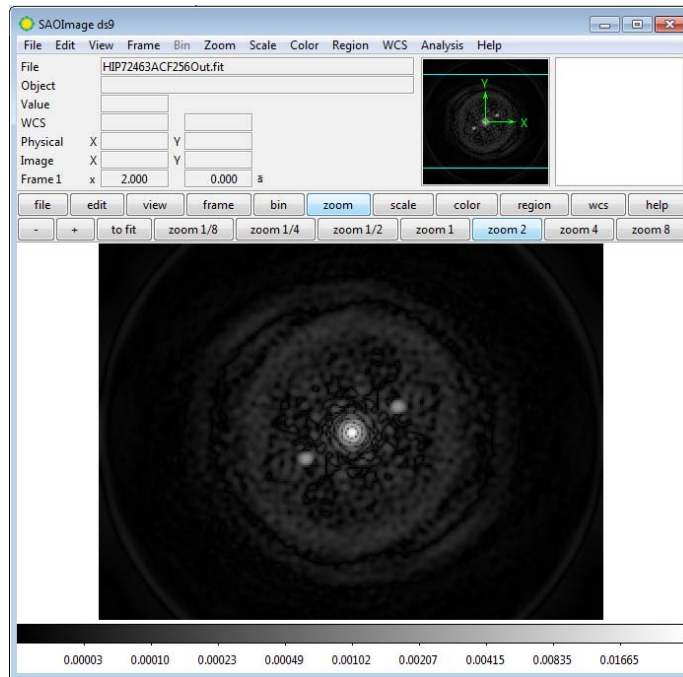


Figura 9.1: Imagen de la función de autocorrelación (ACF), procesada por Fig.8.5. HIP72463

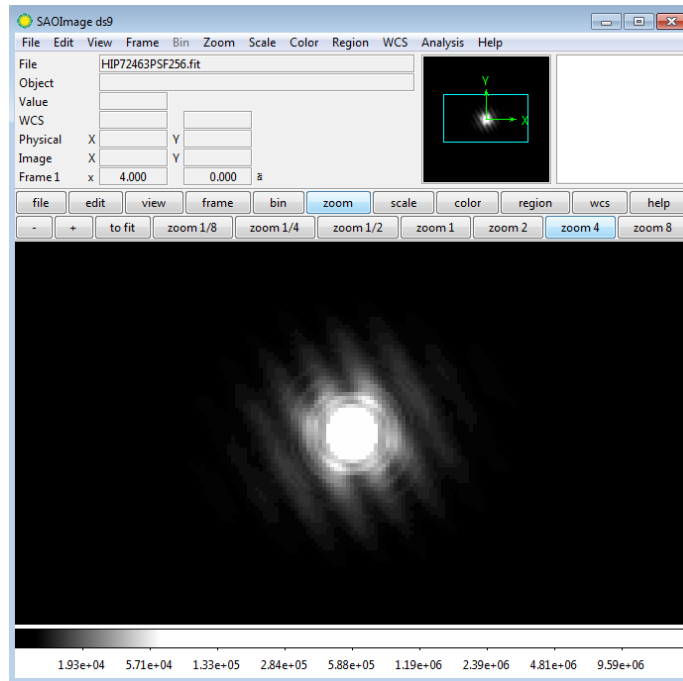


Figura 9.2: Espectro de potencias (PSF), procesado por Fig.8.5. HIP72463

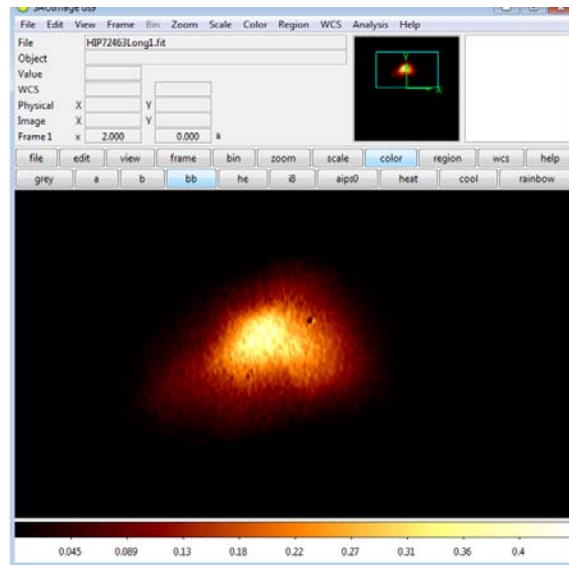


Figura 9.3: Imagen de motas, procesado por Fig.8.9. HIP72463

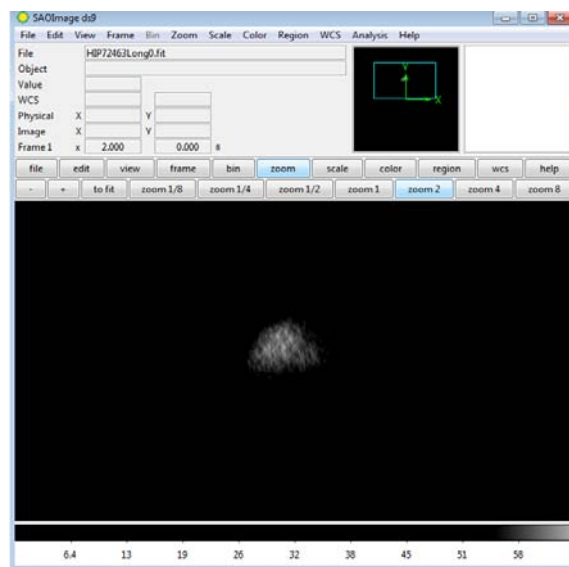


Figura 9.4: Imagen de motas de alto contraste, procesada por Fig.8.11. HIP72463

Otros resultados semejantes se pueden observar en las imágenes procesadas de cuatro sistemas, tomados como muestra, que aparecen en la Tabla (9.1); HIP59540, HIP85371, HIP87313, HIP62018, cuyos parámetros están registrados en el mismo cuadro anterior.

§9.2. HIP59540

HIP59540 en Figuras (9.5), (9.6), (9.7) y (9.8).

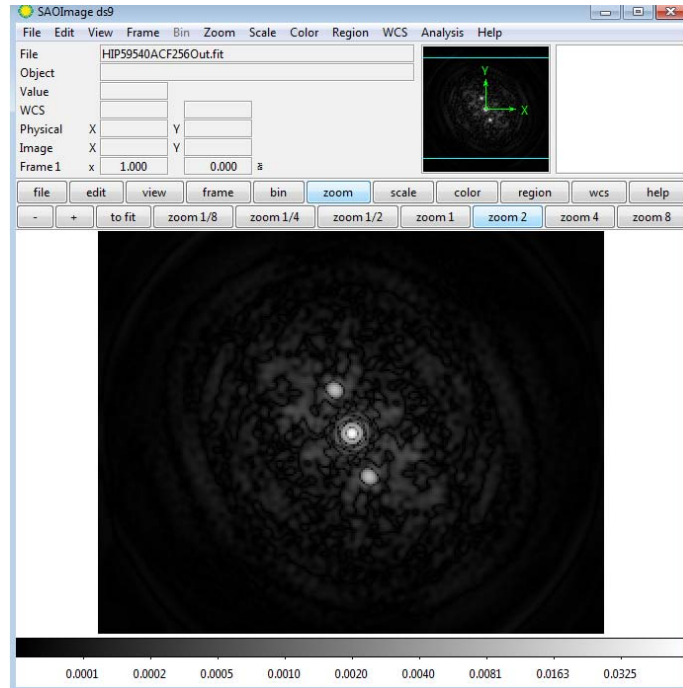


Figura 9.5: Imagen de la función de autocorrelación (ACF), procesada por Fig. (8.5). HIP59540

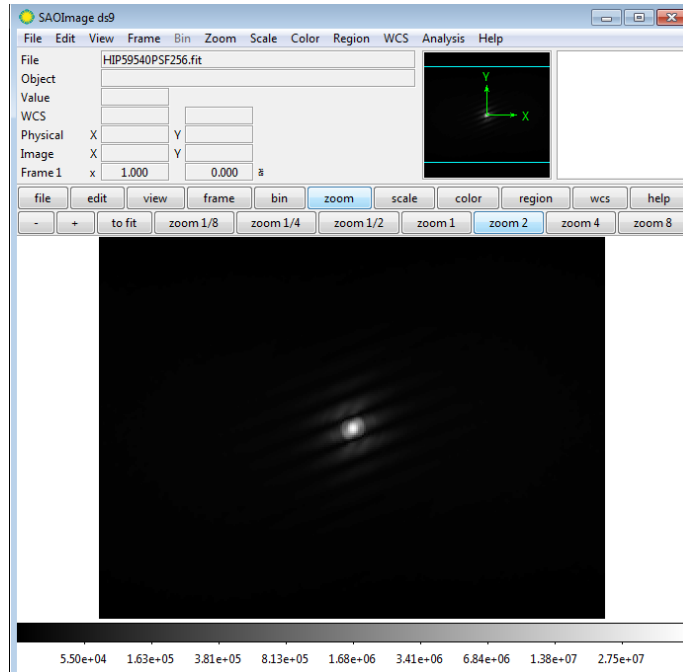


Figura 9.6: Espectro de potencias (PSF), procesado por Fig.8.5. HIP59540

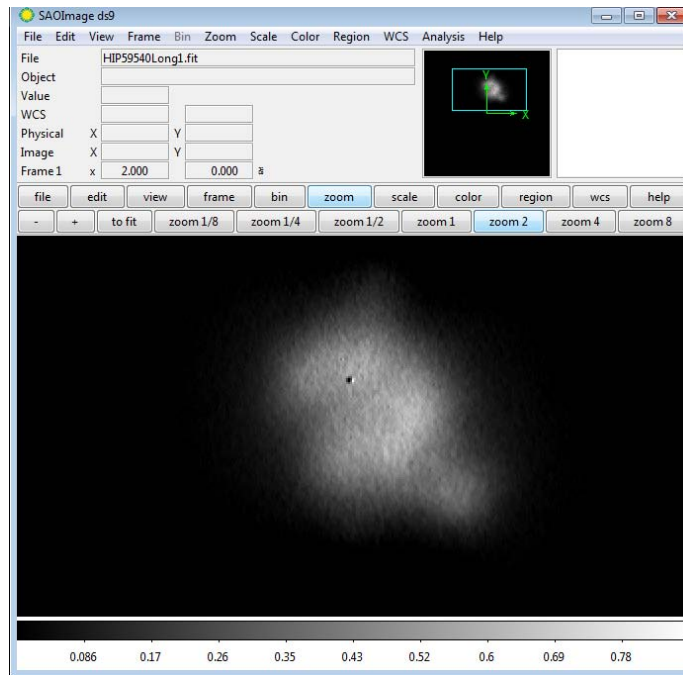


Figura 9.7: Imagen de motas, procesado por Fig.8.9. HIP59540

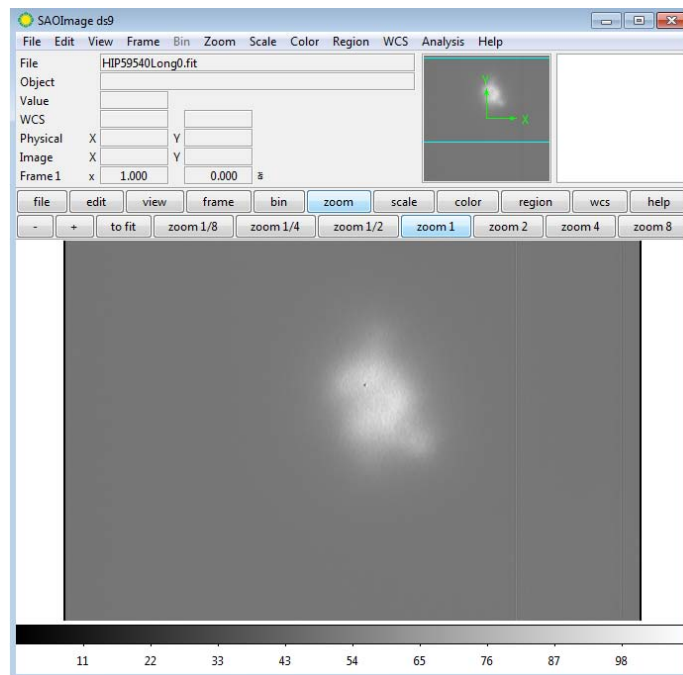


Figura 9.8: Imagen de motas de alto contraste, procesada por Fig.8.11. HIP59540

§9.3. HIP87313

HIP87313 en Figuras (9.9), (9.10), (9.11) y (9.12).

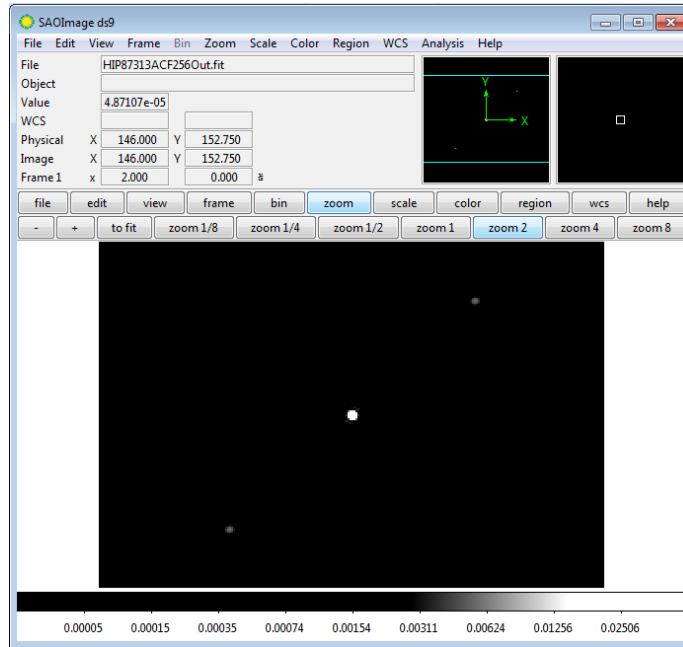


Figura 9.9: Imagen de la función de autocorrelación (ACF), procesada por Fig.8.5. HIP87313

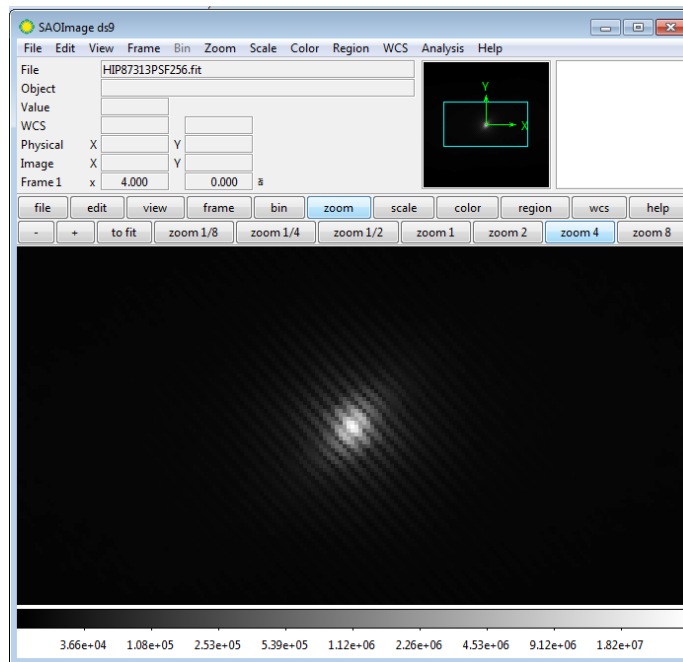


Figura 9.10: Espectro de potencias (PSF), procesado por Fig.8.5. HIP87313

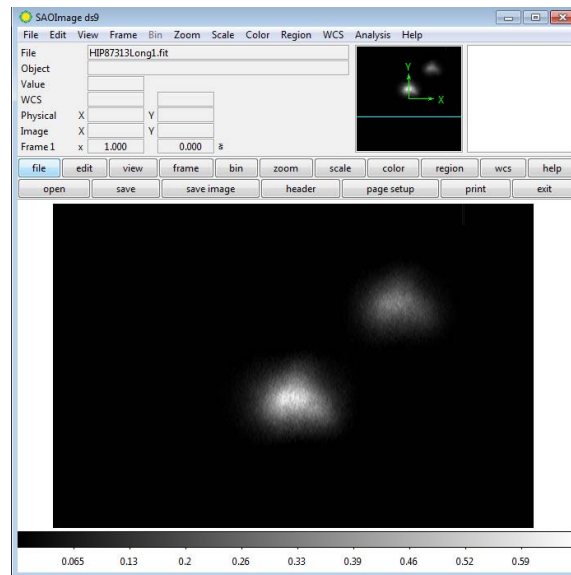


Figura 9.11: Imagen de motas, procesado por Fig.8.9. HIP87313

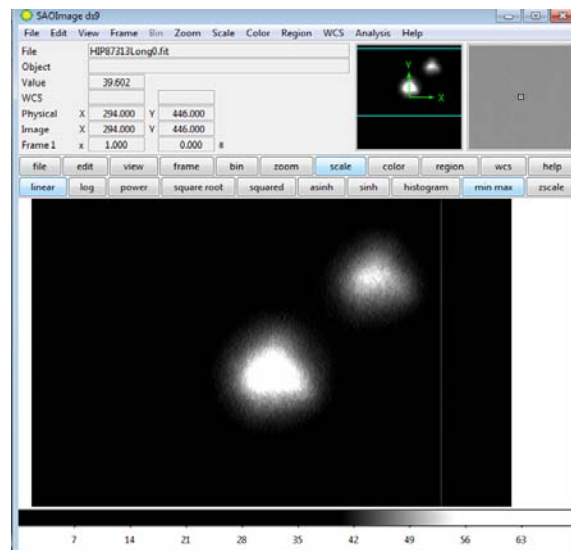


Figura 9.12: Imagen de motas de alto contraste, procesada por Fig.8.11. HIP87313

§9.4. HIP62018

HIP62018 en Figuras (9.13), (9.14), (9.15) y (9.16).

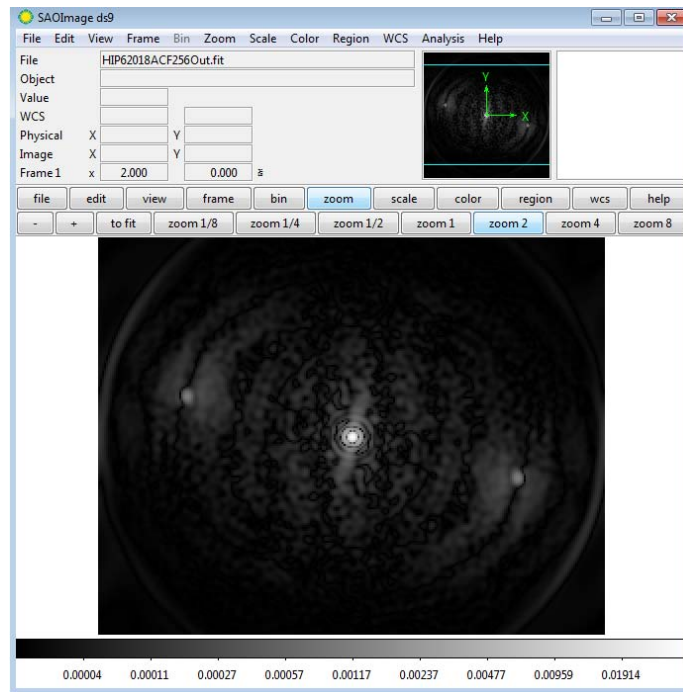


Figura 9.13: Imagen de la función de autocorrelación (ACF), procesada por Fig.8.5. HIP62018

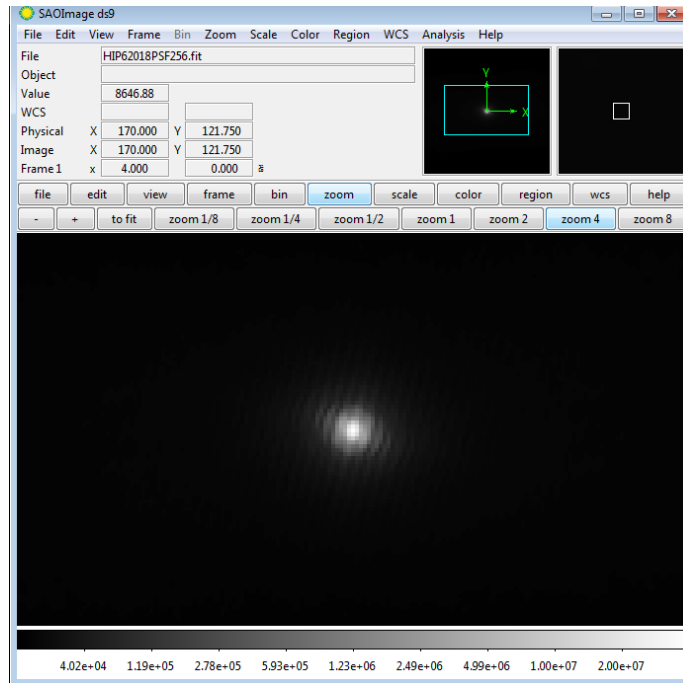


Figura 9.14: Espectro de potencias (PSF), procesado por Fig.8.5. HIP62018

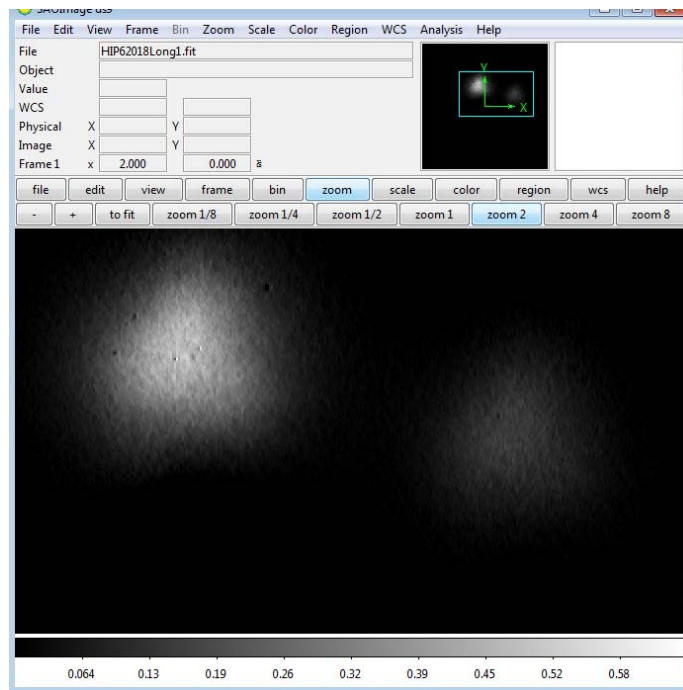


Figura 9.15: Imagen de motas, procesado por Fig.8.9. HIP62018

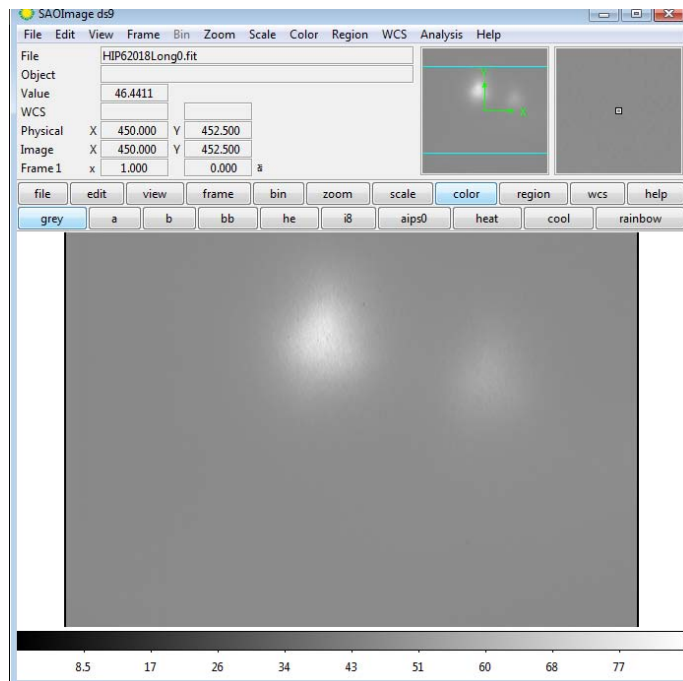


Figura 9.16: Imagen de motas de alto contraste, procesada por Fig.8.11. HIP62018

§9.5. Conclusiones

Se tomaron aleatoriamente 826 estrellas del catálogo HIPPARCOS que fueran visibles en las temporadas de observación planeadas y por ser objetos cercanos de menos de 500 pc (parsec), siendo el error aproximado de medición de un grado. Se lograron verificar 39 sistemas binarios de HIPPARCOS, de los cuales uno de ellos (HIP72463), no se encontraba clasificado en el catálogo de estrellas binarias de Washington (WDS), pero si se encontraron en Simbad y en el catálogo de Hipparcos. Esto muestra la importancia de actualizar los catálogos con nuevas observaciones.

Se encontró una razón de aproximadamente 21:1 de estrellas individuales a binarias, lo que nos da un porcentaje para los sistemas binarios del 4.8 % para el catálogo de Hipparcos en el intervalo $0.37 < \rho < 4.32$ y $\Delta m < 9$ estudiado.

Menos de la mitad de todas las estrellas son estrellas solitarias como el Sol. Más del 50 %, pertenecen a sistemas que contienen dos o más miembros. En general, los sistemas múltiples tienen una estructura jerárquica. Una estrella, un sistema binario orbitando alrededor de cada una en un sistema triple, dos binarias orbitando alrededor de cada una, una en sistemas cuádruples. Así la mayoría de los sistemas pueden ser descritos como binarias con varios niveles.

Con este trabajo se ha logrado aportar una valiosa herramienta para la investigación de estrellas binarias y sistemas múltiples, para los cuales se pueden calcular sus parámetros físicos por medio de la interferometría de motas.

En cuanto a los resultados obtenidos de las observaciones en los telescopios del OAN, tanto en Tonantzintla como en San Pedro Martir, podemos concluir que esta técnica y este trabajo le dan un potencial extra a los telescopios, para que no se vuelvan obsoletos, como podría ser el de Tonantzintla, que por la alta contaminación lumínica, proveniente de la ciudad de Puebla, ha caído en desuso prácticamente. Esta técnica permite seguir trabajando con ellos, en áreas de investigación diversa, como la caracterización de exoplanetas, el cual es un tema y de investigación de actualidad.

Apéndice A

SPECKLE INTERFEROMETRY AT THE OBSERVATORIO ASTRONÓMICO NACIONAL. I

§A.1. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, 45,
155-159 (2009)

V. G. Orlov, V. V. Voitsekhovich, G. A.
Mendoza-Valencia, A. Svyryd, J. L. Rivera, F. Ortiz,
and C. A. Guerrero.

Received 2009 April 17; accepted 2009 June 1

SPECKLE INTERFEROMETRY AT THE OBSERVATORIO ASTRONÓMICO NACIONAL. I

V. G. Orlov,¹ V. V. Voitsekhovich,¹ G. A. Mendoza-Valencia,^{1,2} A. Svyryd,^{1,2}
J. L. Rivera,¹ F. Ortiz,¹ and C. A. Guerrero¹

Received 2009 April 17; accepted 2009 June 1

RESUMEN

Presentamos los resultados de mediciones mediante interferometría de motas de algunas estrellas binarias, llevadas a cabo en noviembre de 2008 en el telescopio de 1 m del Observatorio Astronómico Nacional en Tonantzintla (Puebla, México). Los datos consisten de 175 ángulos de posición y separaciones medidas para 163 sistemas. Las separaciones medidas están comprendidas entre 0.15'' y 4.00''. La magnitud máxima de las componentes más brillantes es igual a 9.32. El error medio en la medición de las separaciones es de 0.03'', y en los ángulos de posición, de 1 grado. La mayor parte de los ángulos de posición tienen la usual ambigüedad de 180 grados, y algunos de ellos se corrigieron comparándolos con observaciones hechas por otros autores.

ABSTRACT

We present the results of speckle interferometric measurements of binary stars performed in November, 2008 with the 1 m telescope at the Observatorio Astronómico Nacional of Tonantzintla (Puebla, Mexico). The data include 175 position angle and separations measured for 163 systems. The measured angular separations range from 0.15'' to 4.00''. The maximum magnitude of the brighter components is equal to 9.32. The mean error in the separation measurement is 0.03'' and in the position angle is 1°. The majority of position angles were determined with the usual 180° ambiguity, and some of them were corrected by comparison with observations performed by other observers.

Key Words: stars: binaries: visual — stars: fundamental parameters — techniques: interferometric — techniques: high angular resolution

1. INTRODUCTION

A binary star system is a pair of stars which are gravitationally bound. The study of the orbital motion around their centre of mass is the only direct method for the calculation of stellar mass, and presently there are many objects which can be investigated with this method. For example, the Washington Double Star Catalog (WDS) includes the notes for more than 84000 components of binary systems (Mason et al. 2001). However, only around 2000 orbits have been calculated up to now (Hartkopf & Mason 2003; Cvetković & Novaković 2006). Some of the stars in the WDS catalog are

optical doubles; however, most of them are members of binary or multiple systems, so it is important to study their behavior. The wide binary systems ($\rho > 1''$) can be observed by amateur astronomers, but close binary systems ($\rho < 1''$) are difficult. Very close binary systems cannot be resolved into two separate stars without using special methods. Results of amateur observations are published in Journal of Double Star Observations (<http://www.jdso.org>). The speckle interferometry (SI) technique (Labeyrie 1970) allows the measurement of close binary systems. This technique recovers the information about relative positions of components in binary and in multiple stars systems with diffraction-limited accuracy.

In a previous paper (Orlov et al. 2007) we have described the usage of SI technique at Observato-

¹Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

²Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

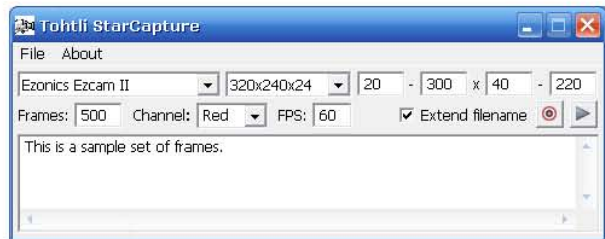


Fig. 1. The Graphic Interface of the Tohtli StarCapture program.

rio Astronómico Nacional (OAN). The OAN is a facility of the Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México (IA-UNAM). There are two astronomical sites where the four telescopes are mounted: one site is located at San Pedro Mártir (OAN-SPM), Baja California, Mexico, and the second one at Tonantzintla (OAN-T), near Puebla, Mexico. The 1 m telescope located at Tonantzintla can be effectively used for speckle interferometric measurements of binary stars to the Rayleigh resolution limit $R = 1.22\lambda/D$.

With this paper we start publishing results of SI observations of binary stars at the telescopes of OAN. In this paper we present result of observations which were carried out in November 2008 at OAN-T. For this observation we prepared an observing list of visual binaries from the WDS Catalog (Worley & Douglass 1997).

2. BRIEF DESCRIPTION OF THE EQUIPMENT

Speckle images were taken with an old Hamamatsu ICCD. The image intensifier of this ICCD does not allow us to take frames with resolutions higher than 25 lines per mm, so frame sizes of 352×240 px were chosen. The microscope objective provides a scale of $0.024 \times 0.026''/\text{px}$ on the detector, with a total field of view of 8.448×6.24 arcsec. The very wide band filter centered at the V band ($\approx 550\text{nm}$) was placed in front of the microscope objective. We developed the special software named Tohtli StarCapture for saving speckle images on the hard disc. Tohtli StarCapture is a video capture software for Windows. It does not require any installation; however it needs DirectX 8 or higher to be installed. It offers the following features:

- Capturing frames from any WDM / DirectX-enabled video device, such as PCI and PC-Card grabbers, TV tuner cards, FireWire cameras, USB/USB2 cameras, and DV (digital video) devices.

- Selecting any video mode exposed by the device.
- Selecting a region from the input video to be captured, so the resulting file will be smaller.
- Saving the frame set to a file without losing any precision using a RAW RGB format.
- Including a Unicode comment in the file.

Figure 1 shows the Graphic Interface of the Tohtli StarCapture program. It is free, and it is available upon request.

3. OBSERVATIONS AND RESULTS

The observations were performed at the 1 m telescope under moderate seeing that we estimated to be between 3 to 4 arcsec. For each binary star, a typical observing procedure involved the accumulation of one set of 999 short exposure images on a hard disk. One short exposure image consists of a two-dimensional 352×240 array of 8-bit numbers. The volume of one set of frames on the hard disk is only 80.5 MB.

The data were processed by the standard speckle algorithm which permits the derivation of binary-star parameters.

The calibration results show that the measured value of the camera orientation error is less than 1° and the scale error less than 1.5%. We must note that the accuracy obtained for the 1 m telescope depends on the separation between stars and on the effective focal length of system. The speckle data processing is made in three classical steps. The first step is the computation of the mean power spectrum (PS) of an object following the standard Labeyrie procedure (Labeyrie 1970). The second step is the Winer filtration of the PS which is applied to remove atmospheric distortions. The third step is the calculation of the autocorrelation function (ACF). As a final step, we compute the distance between stars and the position angle. The position of the component is calculated as the weighted center of the ACF in some area around the maximum value. Table 1 presents the main body of performed measures. Columns 1 and 2 give the identification number in the WDS (Worley & Douglass 1997) and discoverer designation. The third column gives the epoch of the observation in fractional Besselian year. The fourth and fifth columns contain the measured position angle θ in degrees and the angular separation ρ in arcseconds.

TABLE 1
SPECKLE MEASUREMENTS ON THE 1 M TELESCOPE

WDS ($\alpha, \delta J2000.0$)	Disc.	Date	P.A. (deg)	Sep. (arcsec)	WDS ($\alpha, \delta J2000.0$)	Disc.	Date	P.A. (deg)	Sep. (arcsec)
00028+0208	BU 281	2008.8875	162.7	1.57	02594 + 0639	STF 334	2008.8878	309.1	1.16
00047+3416	STF3056	2008.8492	139.7	0.77	03005 + 1800	STT 49	2008.8878	49.6	2.27
00073+0742	HDS 13	2008.8875	323.3	0.39	03051 + 1047	TDS2438	2008.8878	115.2	0.54
00089+0042	HDS 18	2008.8875	151.5	0.25	03096 + 0512	A 2030	2008.8878	12.7	0.27
00095+1907	COU 247	2008.8875	256.2	0.31	03140 + 0044	STF 367	2008.8878	134.1	1.23
00118+2825	BU 255	2008.8493	69.0	0.47	03160 - 0555	BU 84	2008.8878	8.5	0.99
00134+2659	STT 2	2008.8493	163.0	0.41	03177 + 3838	STT 53	2008.8497	242.6	0.67
00174+0853	A 1803	2008.8875	235.4	3.98	03184 - 0056	AC 2	2008.8878	260.0	1.25
00206+1219	BU 1015	2008.8875	103.8	0.49	03206 + 1911	STF 377	2008.8878	111.1	1.16
00209+1059	BU 1093	2008.8875	118.2	0.77	03213 + 1038	HEI 449	2008.8878	66.5	0.23
00266-0003	HDS 61	2008.8875	275.9	0.43	03284 - 0434	BU 1180	2008.8878	24.4	0.37
00352-0336	HO 212	2008.8876	207.4	0.15	03286 + 2904	STF 395	2008.8879	91.0	1.84
00424+0410	STT 18	2008.8876	209.4	1.97	03307 - 0416	STF 408	2008.8878	322.9	1.18
00470-0115	BU 494	2008.8876	161.1	1.29	03312 + 1947	STF 403	2008.8879	173.1	2.32
00487+1841	BU 495	2008.8876	257.0	0.26	03318 + 0749	A 1931	2008.8878	50.0	0.85
00516+2237	A 1808	2008.8494	199.7	0.19	03344 + 2428	STF 412	2008.8497	354.5	0.73
00521+1036	STF 67	2008.8876	350.7	2.28	03344 + 2428	STF 412	2008.8879	354.5	0.74
00546+1911	STT 20	2008.8876	183.9	0.57	03356 + 3141	BU 533	2008.8879	222.4	1.07
00550+2338	STF 73	2008.8494	321.9	1.04	03362 + 4220	A 1535	2008.8879	340.2	0.75
00554+3040	BU 500	2008.8494	122.6	0.48	03372 + 0121	A 2419	2008.8879	100.8	0.82
00583+2124	BU 302	2008.8494	206.6	0.30	03426 + 0838	HDS 472	2008.8879	245.1	0.54
00593-0040	A 1902	2008.8876	208.9	0.36	03443 + 3217	BU 535	2008.8879	23.7	1.04
01005+1841	HDS 132	2008.8876	135.0	0.41	03463 + 2411	BU 536	2008.8879	179.7	1.00
01007+0929	STF 82	2008.8876	305.4	1.86	03489 + 1143	A 831	2008.8879	46.2	0.26
01014+1155	BU 867	2008.8876	355.0	0.66	03493 - 0127	RST4760	2008.8879	286.0	0.81
01040+3528	HO 213	2008.8494	115.9	0.28	03520 + 0632	KUI 15	2008.8879	207.5	0.78
01063-0016	HDS 141	2008.8876	14.8	0.26	03521 + 4048	STT 66	2008.8879	145.0	1.03
01097+2348	BU 303	2008.8494	293.0	0.62	03565 + 0734	A 1935	2008.8879	4.8	0.56
01196-0520	A 313	2008.8876	324.7	0.23	03590 + 0947	HU 27	2008.8879	329.7	0.40
01213+1132	BU 4	2008.8876	109.9	0.59	04064 + 4325	A 1710	2008.8879	313.4	0.63
01291+1026	HDS 195	2008.8877	185.4	0.19	04069 + 3327	STT 71	2008.8497	230.3	0.76
01315+1521	BU 506	2008.8877	61.8	0.61	04081 + 3407	COU1082	2008.8879	57.4	0.31
01360+0739	STF 138	2008.8877	59.6	1.74	04081 + 3407	COU1082	2008.8497	56.4	0.32
01393+1638	BU 5	2008.8877	284.1	0.55	04089 + 2911	BU 1232	2008.8879	353.5	0.32
01512+2439	HO 311	2008.8495	173.5	0.34	04091 + 2839	HO 326	2008.888	290.1	0.41
01532+1526	BU 260	2008.8877	260.0	1.14	04117 + 3133	COU 880	2008.888	42.6	0.77
01559+0151	STF 186	2008.8877	247.3	0.87	04124 + 2334	COU 703	2008.888	98.0	1.09
02020+0246	STF 202	2008.8877	268.9	1.86	04140 + 4235	A 1711	2008.888	80.7	0.69
02026+0905	MCA 4	2008.8877	152.3	0.18	04159 + 3142	STT 77	2008.8497	294.6	0.56
02052-0058	BU 516	2008.8877	316.6	0.69	04159 + 3142	STT 77	2008.888	294.1	0.56
02070-0413	HDS 283	2008.8877	269.5	0.92	04170 + 1941	HO 328	2008.888	1.6	0.48
02214+0853	BU 8	2008.8877	224.7	1.53	04182 + 2248	STF 520	2008.8497	78.1	0.60
02280+0158	KUI 8	2008.8877	38.8	0.51	04182 + 2248	STF 520	2008.888	78.3	0.60
02296+0934	BU 518	2008.8877	143.2	1.50	04263 + 3443	HU 609	2008.8497	305.4	0.18
02409+0452	STT 45	2008.8878	264.3	0.84	04316 + 3739	BU 789	2008.8881	322.8	0.94
02460-0457	BU 83	2008.8878	16.6	0.94	04348 + 2242	STF 562	2008.8881	284.9	1.89
02477+0142	A 2411	2008.8878	284.9	0.32	04357 + 3944	HU 1084	2008.8498	75.9	0.24
02513+0142	VOU 36	2008.8878	12.2	0.32	04366 + 1946	STT 86	2008.8498	0.9	0.48
02572+0153	A 2413	2008.8878	157.2	0.54	04385 + 2656	STF 572	2008.8498	190.2	4.25
02586+2408	BU 1173	2008.8496	99.7	0.21	04422 + 3731	STF 577	2008.8498	344.0	0.76
02589+2137	BU 525	2008.8496	271.9	0.55	04422 + 3731	STF 577	2008.8881	344.2	0.76

TABLE 1 (CONTINUED)

WDS ($\alpha, \delta J2000.0$)	Disc.	Date	P.A. (deg)	Sep. (arcsec)	WDS ($\alpha, \delta J2000.0$)	Disc.	Date	P.A. (deg)	Sep. (arcsec)
04529 + 3548	HU 819	2008.8881	277.3	0.46	06097 + 2914	A 54	2008.8882	333.6	0.57
05017 + 2050	HU 445	2008.8498	133.8	0.39	06117 + 2846	A 55	2008.8882	260.5	0.42
05017 + 2640	A 1844	2008.8881	349.3	0.30	06200 + 2826	BU 895	2008.85	158.9	0.24
05044 + 2139	COU 154	2008.8881	301.4	0.20	06211 + 3619	A 1954	2008.8882	109.3	0.68
05044 + 2139	COU 154	2008.8498	302.3	0.21	06256 + 2227	STT 139	2008.8882	256.7	0.72
05044 + 2938	A 1024	2008.8881	333.8	0.78	06290 + 2013	BU 1192	2008.8882	320.9	0.25
05055 + 1948	STT 95	2008.8498	298.1	0.95	06317 + 2823	BU 1021	2008.8882	76.7	0.73
05055 + 1948	STT 95	2008.8881	298.1	0.96	06357 + 2816	A 506	2008.8882	39.5	0.21
05056 + 2304	STT 97	2008.8498	153.3	0.34	06396 + 2816	STT 152	2008.85	36.1	0.87
05056 + 2304	STT 97	2008.8881	149.3	0.35	07486 + 2308	WRH 15	2008.8501	33.0	0.26
05060 + 3556	HDS 664	2008.8498	33.1	0.23	07560 + 2342	COU 929	2008.8501	196.6	0.27
05064 + 4002	HU 1095	2008.8881	36.7	0.35	22288 - 0001	STF2909	2008.8873	170.7	2.11
05072 + 2224	COU 155	2008.8881	330.6	0.23	22295 - 0012	BU 76	2008.8873	8.4	1.64
05072 + 2224	COU 155	2008.8498	335.6	0.26	22352 + 1437	HU 982	2008.8874	219.0	0.58
05081 + 2416	HDS 674	2008.8881	202.5	0.37	22385 + 0218	HO 479	2008.8874	63.3	0.38
05103 + 3718	STF 644	2008.8881	222.3	1.64	22400 + 0113	A 2099	2008.8874	164.1	0.79
05131 + 2424	COU 468	2008.8882	39.3	0.63	22409 + 1433	HO 296	2008.8874	77.9	0.38
05140 + 3655	POP 140	2008.8498	166.5	0.31	22552 - 0459	BU 178	2008.8874	323.4	0.66
05219 + 3934	COU2037	2008.8498	145.7	0.39	22579 + 1337	HU 989	2008.8874	72.6	0.35
05270 + 2737	HO 226	2008.8498	90.3	0.70	22586 + 0921	STT 536	2008.8874	166.6	0.33
05297 + 3523	HU 217	2008.8498	253.9	0.62	22592 + 1144	STT 483	2008.8874	359.0	0.47
05351 + 3056	BU 1267	2008.8498	174.4	0.40	23078 + 1240	BU 1025	2008.8874	327.1	0.83
05386 + 3030	BU 1240	2008.8498	328.9	0.16	23088 + 1058	A 1238	2008.8874	118.4	0.31
05399 + 3757	STT 112	2008.8498	49.8	0.89	23141 - 0238	BU 714	2008.8874	107.0	0.35
05449 + 2621	A 496	2008.8499	5.8	0.29	23176 + 1818	HU 400	2008.8874	84.1	0.34
05460 + 2119	STF 787	2008.8499	57.2	0.72	23176 - 0131	BU 79	2008.8874	13.2	1.65
05499 + 3147	STF 796	2008.8499	63.0	3.74	23189 + 0524	BU 80	2008.8875	229.3	0.52
05522 + 3834	STF 799	2008.85	162.3	0.77	23309 + 0929	STT 497	2008.8875	217.2	1.42
05558 + 3656	STT 122	2008.8882	88.9	0.37	23311 + 1847	STF3020	2008.8875	100.7	2.26
05558 + 3656	STT 122	2008.85	87.8	0.38	23322 + 0705	HU 298	2008.8875	53.3	0.16
05580 + 2437	COU 905	2008.85	206.5	0.23	23324 + 1724	STF3023	2008.8875	281.4	1.79
05580 + 2437	COU 905	2008.8882	204.0	0.24	23407 - 0023	STF3030	2008.8875	223.0	2.46
06046 + 4535	A 1729	2008.8882	72.8	0.73	23460 + 0016	STF3036	2008.8875	222.5	2.64
06078 + 4240	STT 130	2008.8882	202.1	0.42	23544 + 0228	STF3045	2008.8875	272.2	1.74
06097 + 2307	BU 1241	2008.85	346.9	0.60	23568 + 0444	A 2100	2008.8875	267.1	0.36
06097 + 2307	BU 1241	2008.8882	247.4	0.61	23587 - 0333	BU 730	2008.8875	322.6	0.78

4. CONCLUSION

A program of speckle observations has been initiated at OAN telescopes, with the goal of obtaining data on the double stars. This study has been started with well-known binaries from WDS catalogue. One hundred seventy five position angle and separation measures for one hundred sixty three binaries have been presented, a subset of which has been used to determine the measurement precision. We only present here the cases when the binary was clearly resolved. The results for binaries which demand a more detailed analysis will be reported in subsequent publications.

REFERENCES

- Cvetković, Z., & Novaković, B. 2006, *Serb. Astron. J.*, 173, 73
- Hartkopf, W. I., & Mason, B. D. 2003, *Sixth Catalog of Orbits of Visual Binary Stars* (Washington: USNO), <http://ad.usno.navy.mil/wds/orb6.html>
- Labeyrie, A. 1970, *A&A*, 6, 85
- Mason, B. D., Wycoff, G. L., Hartkopf, W. I., Douglass, G. G., & Worley, C. E. 2001, *AJ*, 122, 3466
- Orlov, V. G., Voitsekhovich, V. V., Sánchez, L. J., & Garfias, F. 2007, *RevMexAA*, 43, 137
- Worley, C. E., & Douglass, G. G. 1997, *A&AS*, 125, 523

- C. A. Guerrero, V. Orlov, F. Ortiz, J. L. Rivera, and V. Voitsekhovich: Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México, Apdo. Postal 70-264, 04510 México, D. F., Mexico (cguerrero, orlov, fortiz, jrivera, voisteko@astroscu.unam.mx).
- G. A. Mendoza-Valencia and A. Svyryd: Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad, 3000, Circuito Exterior s/n, Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad Universitaria, México, D. F., Mexico (gustahavo@gmail.com, tantanoid@yahoo.com).

Apéndice B

SPECKLE INTERFEROMETRY AT THE OBSERVATORIO ASTRONÓMICO NACIONAL. II

§B.1. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, 46,
245-251 (2010)

V. G. Orlov, V. V. Voitsekhovich, J. L. Rivera,
C. A. Guerrero, and F. Ortiz.

Instituto de Astronomía, Universidad Nacional
Autónoma de México, México.

Received 2010 March 27; accepted 2010 May 27

SPECKLE INTERFEROMETRY AT THE OBSERVATORIO ASTRONÓMICO NACIONAL. II

V. G. Orlov, V. V. Voitsekhovich, J. L. Rivera, C. A. Guerrero, and F. Ortiz

Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico

Received 2010 March 27; accepted 2010 May 27

RESUMEN

Presentamos mediciones interferométricas de motas para estrellas binarias, obtenidas en junio de 2009 en el telescopio de 1.5 m del Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir (México). Nuestros datos comprenden 189 mediciones de ángulos de posición y separaciones de 144 sistemas. Las separaciones angulares medidas abarcan desde $0''.16$ hasta $3''.64$. La magnitud máxima de la componente más brillante es de 10.96. El error medio en las separaciones es de $0''.02$ y en los ángulos de posición de 1.5° . Algunos ángulos de posición se determinaron con la ambigüedad usual de 180° .

ABSTRACT

We present speckle interferometric measurements of binary stars made during June of 2009 with the 1.5 m telescope of the Observatorio Astronómico Nacional at SPM (Mexico). The data contain 189 position angle and separation measures of 144 systems. The measured angular separations range from $0''.16$ to $3''.64$. The maximum magnitude of the brighter component is 10.96. The mean error in separation is $0''.02$ and in the position angles 1.5° . Some of the position angles were determined with the usual 180° ambiguity.

Key Words: binaries: visual — stars: fundamental parameters — techniques: high angular resolution — techniques: interferometric

1. INTRODUCTION

In our previous paper (Orlov et al. 2009) we reported results of speckle observations of binary stars obtained at the 1 m telescope of Observatorio Astronómico Nacional at Tonanzintla (OAN-Tonanzintla), Mexico. The telescope is located at a site with moderate seeing. As it is well known the resolution of speckle interferometry (SI) does not depend on seeing. However, the limiting magnitude of stars which can be resolved by SI does depend on seeing. The Instituto de Astronomía has a total of four telescopes. Three of them are situated at Observatorio Astronómico Nacional at San Pedro Mártir, Mexico (OAN-SPM). The OAN-SPM is located in one of the best astronomical sites (Ávila, Cruz-González, & Tapia 2003). Included at the SPM site are 3 telescopes: 84 cm, 1.5 m and 2.1 m.

In this paper we present results from four observing nights in June 2009. The observations were performed at the 1.5 m telescope of the OAN-SPM.

2. OBSERVATIONS

The observations were performed at the 1.5 m telescope of the Observatorio Astronómico Nacional which is located at the San Pedro Mártir (Mexico). For these observations we used the DRAGON equipment (Voitsekhovich et al. 2005), which was slightly modified to be able to record speckle interferograms (Orlov et al. 2007). During the observations we had good seeing conditions. We estimated that the seeing was between 0.7 to 1 arcsec. Unfortunately, aberrations introduced by the telescope had a larger effect. It can be clearly seen on a centered image of one of the stars (Figure 1). Aberrations of the 1.5 m mirror cannot be corrected because the telescope is not equipped with an active optics system.

After calibration we determine the Pixel Scale = $0.024''/\text{px}$ and detector orientation. For calibration we used 40 wide pairs with very slow orbital motions and some of them with known orbital parameters.

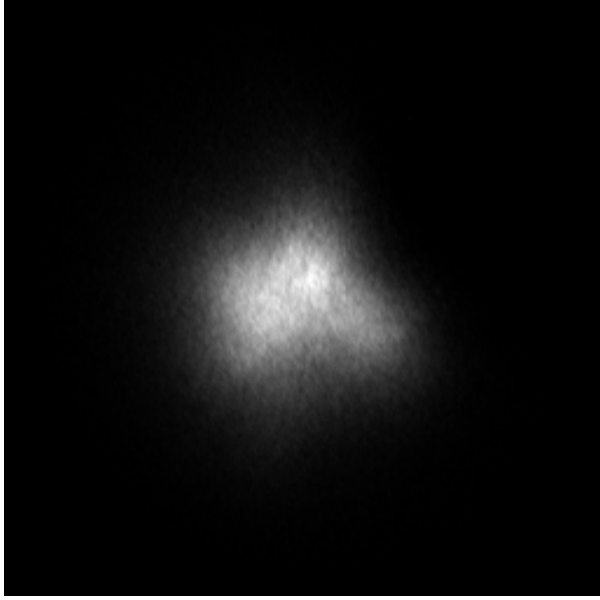


Fig. 1. The centered image of the binary star COU 1581. It was obtained by averaging 700 previously centered speckle interferograms. The window is $6''.3 \times 6''.3$.

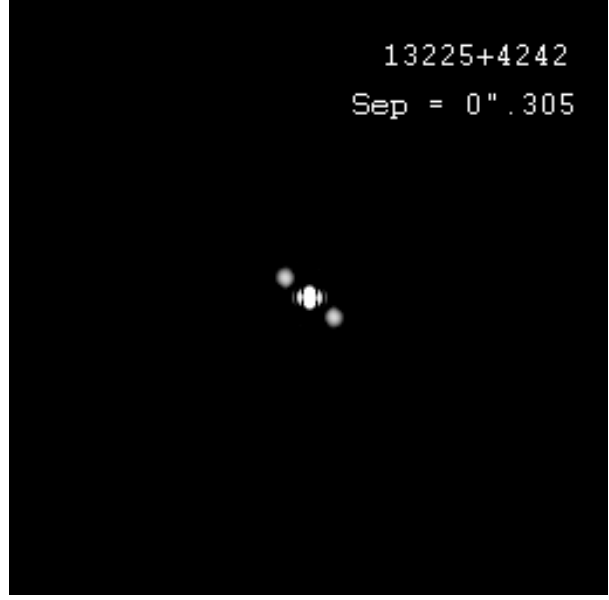


Fig. 2. Reconstructed ACF of the binary star COU 1581. Separation = $0''.305$.

During four nights of observations we made 189 measurements of 144 pairs. Most of observed binaries have separations less than $1''$. Table 1 shows how these 144 pairs are distributed according to their separations.

3. DATA PROCESSING AND RESULTS

For each binary star, a typical observing procedure involved the accumulation of one set of 700 short exposure images on hard disk. One short exposure image consists of a two-dimensional 582×584 array of 8-bit numbers. The volume of one set on the hard disk is 226 MB. The data were processed by the algorithm which was explained in detail by Tokovinin, Mason, & Hartkopf (2010). This algorithm permits derivation of the binary star parameters without using the reference star. The resulting autocorrelation function (ACF) of one binary star COU 1581 calculated by this algorithm is shown in Figure 2. The position of the secondary is calculated as the center of weight of values of the ACF in a region around the maximum value.

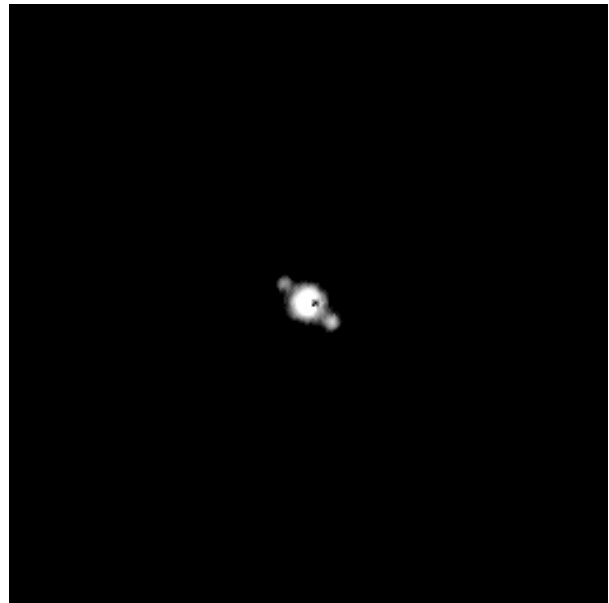


Fig. 3. Result of self-calibrating shift-and-add technique for the binary star COU 1581.

TABLE 1
DISTRIBUTION OF PAIRS BY THEIR
SEPARATIONS

$> 1''.5$	$1''.5 - 1''$	$1'' - 0''.5$	$0''.5 - 0''.25$	$< 0''.25$
18	23	38	57	12

As is well known, the ACF has no information about the Fourier phase of the image; therefore, the position angle is determined only modulo 180° . To avoid this inconvenience we also used Christou's self-calibrating shift-and-add technique (Christou et al. 1986). Figure 3 shows an image which was calculated using this technique. We have to admit that the

TABLE 2
SPECKLE MEASUREMENTS ON THE 1.5 M TELESCOPE

WDS ($\alpha, \delta J2000.0$)	Disc. Name	Date Besselian	P.A (deg)	Sep. (arcsec)	P.A. Orb. (deg)	Sep. Orb. (arcsec)	Reference
12154+4008	A 1999	2009.4326	62.2	0.29	40.9	0.53	Seymour et al. 2002
12182+2718	HDS1733	2009.4410	241.9	0.32			
12244+4305	STT 250	2009.4327	351.2	0.33			
12306+3431	HDS1759	2009.4327	203.3	0.27			
12328+2301	AG 179	2009.4327	142.0	0.99			
12510+3129	HDS1804	2009.4300	256.8	0.75			
12510+3129	HDS1804	2009.4327	257.2	0.75			
12575+2457	COU 397	2009.4300	60.6	0.68			
12575+2457	COU 397	2009.4410	60.6	0.68			
12575+2457	COU 397	2009.4327	61.1	0.69			
13004+3545	HU 1141	2009.4327	343.5	0.49			
13037+2339	STF1714	2009.4410	307.2	3.12			
13037+2339	STF1714	2009.4327	307.2	3.13			
13063+2044	HU 739	2009.4327	204.1	1.37	207.3	1.39	Seymour et al. 2002
13063+2044	HU 739	2009.4410	204.1	1.37			
13091+2127	HU 572	2009.4411	344.6	0.46	10.1	0.35	Zulevic 1969
					105.5	0.52	Baize 1981
					50.7	0.35	Baize 1986
13128+4030	A 1606	2009.4328	195.9	1.29			
13128+4030	A 1606	2009.4411	196.5	1.30			
13221+3952	HDS1876	2009.4300	88.9	0.26			
13225+4242	COU1581	2009.4411	157.5	0.33			
13266+3235	COU 787	2009.4300	147.4	0.34			
13280+3235	A 1856	2009.4411	343.5	1.08			
13280+3235	A 1856	2009.4328	343.7	1.07			
13305+3430	A 1857	2009.4301	340.9	0.48			
13305+3430	A 1857	2009.4328	341.4	0.47			
13348+4242	HDS1908	2009.4411	24.1	0.48			
13387+3823	COU1429AB	2009.4411	64.0	0.66			
13387+3823	COU1429AB	2009.4301	64.4	0.66			
13465+1545	A 2063	2009.4411	136.9	0.23			
13465+1545	A 2063	2009.4328	136.9	0.19			
13465+1545	A 2063	2009.4301	137.4	0.25			
13509+3555	COU1132	2009.4301	147.5	0.79			
13509+4422	A 1613AB	2009.4328	259.9	3.08			
13571+3426	BU 937	2009.4301	135.0	1.04			
14082+3645	STT 276AB	2009.4301	206.9	0.44			
14087+3341	HU 742	2009.4329	354.0	0.24	67.0	0.29	Popovic 1972
14087+3341	HU 742	2009.4412	355.6	0.25			
14109+1513	HDS1989Aa,Ab	2009.4412	358.7	0.43			
14109+2412	HDS1988	2009.4329	150.2	3.29			
14113+3013	COU 605	2009.4412	163.5	0.26			
14113+3013	COU 605	2009.4329	164.4	0.27			
14124+2843	STT 277AB	2009.4301	64.3	0.19			
14164+2539	HDS2006	2009.4412	249.2	0.70			
14184+3412	HU 901	2009.4301	32.6	0.61			
14276+2037	HO 542	2009.4329	213.6	0.98			
14278+3257	STF1848	2009.4302	356.2	3.09			
14278+3257	STF1848	2009.4412	356.3	3.08			
14295+3612	HU 1268	2009.4412	345.2	0.30	313.0	0.38	Erceg 1975
14436+3745	STF1875	2009.4329	128.5	3.06			
14485+2445	COU 304	2009.4329	300.8	0.46			

TABLE 2 (CONTINUED)

WDS ($\alpha, \delta J2000.0$)	Disc. Name	Date Besselian	P.A. (deg)	Sep. (arcsec)	P.A. Orb. (deg)	Sep. Orb. (arcsec)	Reference
15002+2129	HU 907	2009.4413	277.3	0.24			
15002+2129	HU 907	2009.4329	278.0	0.21			
15049+3428	STF1908AB	2009.4413	151.4	1.33			
15075+1541	A 2228	2009.4330	12.2	3.29			
15136+3453	HO 60	2009.4413	68.1	0.18	72.7	0.16	Baize 1993a
15136+3453	HO 60	2009.4330	73.5	0.16	72.7	0.16	Baize 1994
15151+3650	STT 295	2009.4413	150.3	0.30			
15192+4329	A 1630	2009.4330	244.8	0.78			
15208+4242	A 573	2009.4413	171.9	0.71			
15257+2638	STF1941	2009.4330	212.6	1.38			
15271+2355	A 82	2009.4330	351.0	0.83			
15272+4133	COU1443	2009.4413	172.8	0.49			
15307+3810	HU 1163	2009.4413	168.1	0.22	189.1	0.17	Couteau 1990
15307+3810	HU 1163	2009.4330	169.3	0.21	191.9	0.21	Zulevic 1995
					191.9	0.21	Zulevic 1996
					169.4	0.21	Hartkopf et al. 2000
15390+2545	COU 612	2009.4413	177.5	0.29	326.6	0.15	Baize 1992a
					326.6	0.15	Baize 1993b
					176.2	0.26	Docobo & Ling 1998a
					173.2	0.30	Aristidi et al. 1999
15404+2123	HU 579	2009.4414	136.5	0.70			
15498+4431	BU 621	2009.4302	26.4	0.67			
15554+2932	HO 399	2009.4302	117.3	3.59			
15574+4140	STF1991AB	2009.4331	195.5	3.02			
15574+4140	STF1991AB	2009.4414	195.8	3.01			
15574+4140	STF1991AB	2009.4302	196.4	2.99			
16115+1507	A 1799	2009.4414	117.6	0.76			
16128+3922	STF2028	2009.4302	144.7	0.39	140.8	0.33	Alzner 2001
16156+1944	HU 480	2009.4331	261.9	1.61			
16161+2936	A 348	2009.4302	149.2	1.04			
16192+4140	STT 309	2009.4302	307.4	0.28	306.6	0.28	Seymour et al. 2002
16199+2341	COU 108	2009.4414	255.1	0.63			
16199+2341	COU 108	2009.4331	255.9	0.62			
16248+3925	HU 1276	2009.4302	270.3	0.39			
16248+3925	HU 1276	2009.4414	270.4	0.42			
16273+2653	A 226	2009.4331	94.1	1.01			
16273+2653	A 226	2009.4415	94.3	1.02			
16309+3804	STF2059	2009.4303	186.3	0.36			
16326+2314	BU 817	2009.4303	327.9	0.94			
16326+2314	BU 817	2009.4331	328.1	0.94			
16384+3514	COU 985	2009.4415	69.4	0.30	79.4	0.20	Baize 1993c
16384+3514	COU 985	2009.4331	70.1	0.30	82.8	0.21	Docobo & Ling 1998b
					82.8	0.20	Docobo et al. 2000
16412+1714	HDS2366	2009.4331	95.8	0.53			
16422+3753	HDS2372	2009.4303	252.1	0.18			
16422+4112	STF2091	2009.4303	325.9	0.40			
16476+4255	COU1452	2009.4415	103.5	0.26			
16476+4255	COU1452	2009.4332	108.6	0.29			
16539+2547	COU 492	2009.4332	91.9	0.52			
16539+2547	COU 492	2009.4415	91.9	0.52			
17063+2631	A 228	2009.4388	185.7	0.46			
17075+3810	COU1291	2009.4303	301.1	0.28	0.6	0.15	Baize 1993c
					356.3	0.07	Docobo & Ling 1998a
					348.0	0.07	Docobo & Ling 2002

TABLE 2 (CONTINUED)

WDS (α, δ J2000.0)	Disc. Name	Date Besselian	P.A. (deg)	Sep. (arcsec)	P.A. Orb. (deg)	Sep. Orb. (arcsec)	Reference
17094+1901	A 2086	2009.4332	204.3	3.14			
17116+3916	HU 1178AB	2009.4332	9.5	0.36			
17116+3916	HU 1178AB	2009.4303	10.4	0.36			
17116+3916	HU 1178AB	2009.4303	10.7	0.36			
17184+3240	BU 628	2009.4303	267.1	0.52	255.4	0.39	Zulevic 1986
17215+2845	KUI 80AB	2009.4388	169.9	0.62			
17221+2310	COU 415	2009.4388	249.3	0.24	174.5	0.27	Baize 1992a
					174.5	0.27	Baize 1993b
17239+3627	STF2162	2009.4304	284.5	1.35			
17250+4306	COU1454	2009.4304	148.0	0.98			
17251+3444	HU 922	2009.4304	225.4	0.21	6.8	0.31	Heintz 1982
17275+1627	A 2184	2009.4388	30.4	1.87			
17377+4250	HDS2489	2009.4304	346.7	0.55			
17377+4250	HDS2489	2009.4332	347.1	0.55			
17412+4139	STF2203	2009.4416	293.7	0.73			
17434+3357	HO 560	2009.4304	263.3	1.32			
17434+3357	HO 560	2009.4416	263.3	1.33			
17434+3357	HO 560	2009.4388	265.2	1.37			
17486+2339	BAR 8	2009.4416	237.8	1.16			
17504+3526*	STF2236	2009.4389	18.9	0.31			
17504+3526*	STF2236	2009.4304	22.6	0.32			
17504+3526	STF2236	2009.4389	97.0	3.39			
17504+3526	STF2236	2009.4304	97.1	3.37			
17506+3932	COU1301	2009.4389	84.3	1.74			
17506+3932	COU1301	2009.4416	85.0	1.74			
17541+2949	AC 9	2009.4389	240.6	1.09			
17577+2815	HO 424	2009.4389	203.0	1.42			
17584+3524	COU1000	2009.4416	153.3	0.89			
17591+3228	HU 1185	2009.4416	138.5	0.36	148.4	0.27	Heintz 1975
18017+4011	STF2267	2009.4304	271.1	0.55			
18017+4011	STF2267	2009.4389	271.7	0.56			
18025+4414	BU 1127AB	2009.4332	52.9	0.73	65.4	1.15	Popovic 1970
					62.6	1.02	Popovic & Pavlovic 1995a
					62.6	1.02	Popovic & Pavlovic 1995b
18033+3921	STF2275	2009.4416	297.2	0.27	300.0	0.26	Popovic 1998
					299.9	0.26	Popovic et al. 2000
18063+3824	HU 1186	2009.4304	115.6	0.25	141.3	0.09	Heintz 1965
18063+3824	HU 1186	2009.4416	123.3	0.30	119.0	0.22	Baize 1992b
					121.1	0.20	Heintz 1995
18126+3836	BU 1091	2009.4305	320.7	0.72			
18126+3836	BU 1091	2009.4416	320.7	0.72			
18178+4351	A 578 AB	2009.4332	157.2	1.75			
18178+4351	A 578 Aa,Ab	2009.4332	247.0	0.31			
18264+4326	HDS2606	2009.4417	49.3	1.02			
18432+3822	HDS2651	2009.4305	50.8	0.44			
18450+4239	HDS2657	2009.4305	37.1	0.21			
19018+3448	COU1612	2009.4305	318.7	0.82			
19072+4451	A 703	2009.4305	188.4	0.54			
19072+4451	A 703	2009.4390	189.3	0.56			
19089+3404	COU1462	2009.4306	204.7	0.19	225.1	0.62	Mante 1994
					203.0	0.20	Mante 1997
					203.0	0.20	Mante 1999
19122+3215	HU 941	2009.4333	146.1	1.08			
19131+2154	A 153	2009.4306	267.7	0.71			

TABLE 2 (CONTINUED)

WDS ($\alpha, \delta J2000.0$)	Disc. Name	Date Besselian	P.A (deg)	Sep. (arcsec)	P.A. Orb. (deg)	Sep. Orb. (arcsec)	Reference
19214+1948	HO 637	2009.4333	27.6	1.20			
19251+2213	COU 513	2009.4333	2.6	0.25			
19266+3120	HDS2762	2009.4306	214.6	0.35			
19272+1626	HDS2765	2009.4333	177.5	0.36			
19331+3254	HU 948AB	2009.4306	149.9	0.26			
19331+3254	HU 948AB	2009.4333	152.2	0.27			
19350+2947	A 368	2009.4306	153.4	0.50			
19356+4002	A 1400	2009.4390	122.5	0.35	134.3	0.24	Seymour et al. 2002
19358+2316	A 163	2009.4333	20.8	0.23	1.7	0.18	Baize 1981
19466+4346	HDS2810	2009.4390	49.5	0.34			
19532+4238	COU2635	2009.4390	157.5	0.54			
19538+2237	COU 825AB	2009.4334	32.0	1.23			
19575+2018	BU 425AB	2009.4334	239.7	1.35			
19583+2208	AG 244AB	2009.4334	273.2	1.51			
20016+3435	COU1947	2009.4307	88.4	0.27			
20082+2105	J 1168	2009.4334	192.6	0.88			
20109+2237	HDS2877	2009.4334	201.4	0.45			
20157+4339	A 2095AB	2009.4390	155.9	0.26	146.7	0.21	Zulevic 1997
					146.8	0.24	Ling 1999
20157+4339	STF2659AC	2009.4390	314.0	3.03			
20172+2415	HDS2893	2009.4334	168.4	0.31			
20177+4030	HDS2897	2009.4390	269.0	0.33			
20302+2651	WOR 9AB	2009.4334	256.4	0.51			
20333+2727	HDS2935	2009.4334	114.1	0.48			
20477+4204	BU 268	2009.4391	199.3	0.39			
20506+3024	STT 415	2009.4280	232.2	3.68			
20531+2909	STT 417AB	2009.4280	27.7	0.90			
20564+4308	COU2544	2009.4391	160.4	0.32			
20564+4308	COU2544	2009.4280	160.5	0.33			
20582+3510	COU1813	2009.4335	308.9	1.16			
21000+4004	KUI 103AB	2009.4335	356.2	0.42	182.6	0.64	Lippincott 1975
21000+4004	KUI 103AB	2009.4280	357.1	0.43	44.0	0.54	Baize 1989
					44.0	0.54	Baize 1991
					40.5	0.60	Heintz 1994
					32.8	0.31	Docobo & Ling 1994
					336.9	0.23	Soderhjelm 1999
					12.4	0.35	Mante 2000
					12.4	0.43	Pourbaix 2000
21018+3916	STF2746	2009.4391	321.1	1.19			
21089+1748	HU 365	2009.4335	19.9	1.03			
21111+1704	HEI 187	2009.4335	255.7	1.13			
21115+4115	STT 431AB	2009.4391	125.2	2.62			
21115+4115	STT 431AB	2009.4281	125.3	2.61			
21143+4109	STT 432	2009.4391	114.8	1.33			
21161+4101	COU2229	2009.4281	272.1	0.78			
21171+4312	A 401	2009.4391	219.7	0.41			
21328+3904	A 1443	2009.4391	240.4	0.27			
21328+3904	A 1443	2009.4281	240.7	0.25			
21334+3058	COU 732Aa,Ab	2009.4336	264.8	0.49			
21356+3446	COU1481	2009.4281	171.7	0.64			
21363+1627	HDS3076	2009.4336	262.5	0.34			
21380+4153	A 402	2009.4281	45.9	0.85			
21421+4414	A 403	2009.4281	77.7	0.48			

technique doesn't work for weak objects when single photon events are strongly dominant in the speckle image.

Table 2 contains 189 measurements pertaining to 144 binary or multiple stars. The format for presentation of these measurements is not the same as in our previous publication (Orlov et al. 2009). We include three new columns for ephemerides of binaries with known orbital elements. Column 1 contains the epoch-2000 coordinates in the format used in the Washington Double Star (WDS) Catalog (Worley & Douglass 1997). The second column gives the name of the star or discoverer designation. The third column gives the epoch of the observation in fractional Besselian year. The two following columns contain the measured position angles θ given in degrees and angular distances ρ in arcseconds. The last three columns show ephemerides calculated for the date of observation and references to publications in which orbital elements can be found. As one can see, some orbits give very discrepant position of the secondary.

4. CONCLUSION

A program of speckle observations has been started at the Observatorio Astronómico Nacional telescopes, with the goal of obtaining astrometric data of double stars. This study started with well-known binaries from the WDS catalogue. One hundred seventy five position angle and separation measures for one hundred sixty three binaries have been presented, a subset of which has been used to determine measurement precision. We only present here the cases where the binary was clearly resolved. The results on binaries which demand more detailed analysis will be reported in subsequent publications.

The speckle interferometry program at the OAN telescopes is supported by the Dirección General de Asuntos del Personal Académico (Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico) under projects IN104910 and IN113308 (PAPIIT).

REFERENCES

- Alzner, A. 2001, *IAUDS, Inf. Circ.* 144
 Aristidi, E., et al. 1999, *A&AS* 134, 545
 Ávila, R., Cruz-González, I., & Tapia, M. 2003, *RevMexAA (SC)*, 19, 121
 Baize, P. 1981, *A&AS*, 44, 199
 ———. 1986, *A&AS*, 65, 551
 ———. 1989, *IAUDS, Inf. Circ.* 107
 ———. 1991, *A&AS*, 87, 49
 ———. 1992a, *IAUDS, Inf. Circ.* 116
 ———. 1992b, *IAUDS, Inf. Circ.* 117
 ———. 1993a, *IAUDS, Inf. Circ.* 120
 ———. 1993b, *A&AS* 99, 205
 ———. 1993c, *IAUDS, Inf. Circ.* 121
 ———. 1994, *A&AS* 106, 267
 Couteau, P. 1990, *IAUDS, Inf. Circ.* 112
 Christou, J. C., Hege, E. K., Freeman, J. D., & Ribak, E. 1986, *J. Opt. Soc. Am.*, A, 3, 204
 Docobo, J. A., & Ling, J. F. 1994, *IAUDS, Inf. Circ.* 124
 ———. 1998a, *IAUDS, Inf. Circ.* 136
 ———. 1998b, *IAUDS, Inf. Circ.* 135
 ———. 2002, *IAUDS, Inf. Circ.* 147
 Docobo, J. A., Balega, Y. Y., Ling, J. F., Tamazian, V., & Vasyuk, V. A. 2000, *AJ*, 119, 2422
 Erceg, V. 1975, *Bull. Obs. Astron. Belgr.*, 126, 50
 Hartkopf, W. I., et al. 2000, *AJ*, 119, 3084
 Heintz, W. D. 1965, *Veroff. Sternw. Munchen*, 7, 7
 ———. 1975, *ApJS*, 29, 331
 ———. 1982, *A&AS*, 47, 569
 ———. 1994, *AJ*, 108, 2338
 ———. 1995, *ApJS*, 99, 693
 Ling, J. F. 1999, *IAUDS, Inf. Circ.* 137
 Lippincott, S. L. 1975, *AJ*, 80, 833
 Mante, R. 1994, *Obs. Trav. Soc. Astron. France*, 39, 21
 ———. 1997, *Obs. Trav. Soc. Astron. France*, 52, 44
 ———. 1999, *IAUDS, Inf. Circ.* 138
 ———. 2000, *IAUDS, Inf. Circ.* 142
 Orlov, V. G., Voitsekovich, V. V., Mendoza-Valencia, G. A., Svyryd, A., Rivera, J. L., Ortiz, F., & Guerrero, C. A. 2009, *RevMexAA*, 45, 155
 Orlov, V. G., Voitsekovich, V. V., Sánchez, L. J., & Garfias, F. 2007, *RevMexAA*, 43, 137
 Popovic, G. M. 1970, *Bull. Obs. Astron. Belgr.*, 28, 141
 ———. 1972, *Bull. Obs. Astron. Belgr.*, 29, 31
 ———. 1998, *IAUDS, Inf. Circ.* 136
 Popovic, G. M., & Pavlovic, R. 1995a, *Bull. Obs. Astron. Belgr.*, 151, 45
 ———. 1995b, *IAUDS, Inf. Circ.* 125
 Popovic, G. M., Pavlović, R., & Zivkov, V. 2000, *A&AS*, 144, 211
 Pourbaix, D. 2000, *A&AS*, 145, 215
 Seymour, D., Mason, B. D., Hartkopf, W. I., & Wycoff, G. L. 2002, *AJ*, 123, 1023
 Soderhjelm, S. 1999, *A&A*, 341, 121
 Tokovinin, A., Mason, B. D., & Hartkopf, W. I. 2010, *AJ*, 139, 743
 Voitsekovich, V. V., Sánchez, L. J., Orlov, V. G., Garfias, F., & Benitez, R. 2005, *RevMexAA*, 41, 399
 Worley, C. E., & Douglass, G. G. 1997, *A&AS*, 125, 523
 Zulevic, D. J. 1969, *Bull. Obs. Astron. Belgr.*, 27, 55
 ———. 1986, *IAUDS, Inf. Circ.* 98
 ———. 1995, *IAUDS, Inf. Circ.* 127
 ———. 1996, *Bull. Obs. Astron. Belgr.*, 153, 79
 ———. 1997, *Bull. Obs. Astron. Belgr.*, 155, 109
- C. A. Guerrero, V. G. Orlov, F. Ortiz, J. L. Rivera, and V. V. Voitsekovich: Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México, Apdo. Postal 70-264, Cd. Universitaria, 04510 México D. F., Mexico (cguerrero, orlov, fortiz, jrivera, voisteko@astroscu.unam.mx).

Apéndice C

Características y funciones básicas de la cámara de video CCD Cam3

§C.1. Introducción

La cámara de video CCTV, usada para la adquisición de imágenes y la realización de éste trabajo, tiene las siguientes características técnicas:

Versión de la aplicación CCTV 1.00

Fecha de realización 01.09.2003

CCTV Design Ltd

TV equipment for astronomical applications

User manual SK 1.131.027 UM

Saint-Petersburg, 2003

En el manual se cuenta con información detallada de las características soportadas por la aplicación CCTV. Para usar todas las funciones de la aplicación se necesita conectar e instalar el hardware requerido. Las secciones en donde se detallan las características y procedimientos son:

-Revisión de la aplicación Cam3User: Breve revisión de la aplicación. Inicia la adquisición de datos.

-Operaciones avanzadas: Temas adicionales sobre la aplicación CCTV. Filtrado y exportación de datos.

-Componente SDK: Guía para programadores. Registro de conexiones de filtrado y exportación.

§C.2. Vista general de la aplicación CCTV

-Instalación y desinstalación

La instalación del software, lleva un proceso estandar, como cualquier otro software de distribución libre, en donde también se pueden recibir actualizaciones, siguiendo las siguientes instrucciones bsicas:

1. Elegir la opción "Start Run" del menu de Microsoft Windows .
2. Click "Browsez selecciona el archivo "setup.exe" de la localización apropiada.



Figura C.1: Instalación y ejecución del software.

3. Click "Ok".
4. Seguir las instrucciones hasta que se complete la instalación, lo mismo para su desinstalación.

§C.3. Iniciando

Para iniciar la aplicación se selecciona *CCTVApplication*, del menu principal de Windows. Si la aplicación no se inicia en unos pocos segundos se debe uno direccionar a la sección de resolución de problemas en el menu del manual.

Es importante destacar, que mientras no se realiza el paso de configuración de hardware, no se debe acceder a la CCD y las funciones de Canales. Esto puede causar que los eventos de fallo de la aplicación deje de responder o de protección general.

Si la aplicación se inició correctamente se puede ver la siguiente ventana en la pantalla:

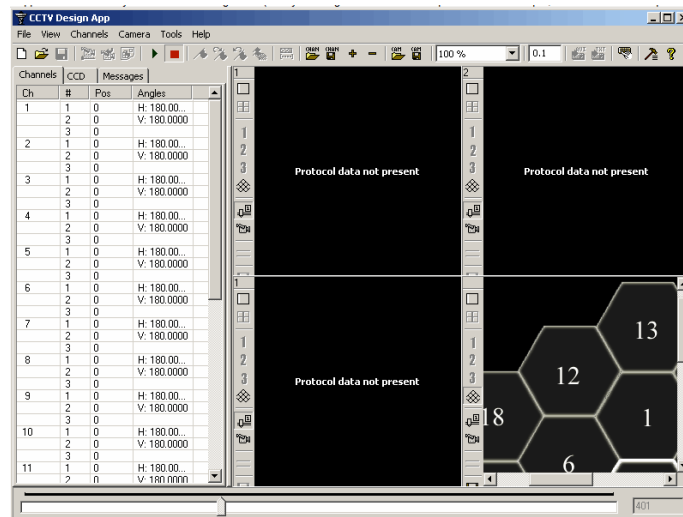


Figura C.2: Ventana de inicio.

Esta pantalla (Figura [C.2]), está dividida en varias áreas:

1. Sección izquierda.

Ésta sección, contiene tres fichas: la ficha Canales, ficha CCD y ficha Mensajes. Ficha Canales contiene la lista de los 19 canales de posiciones. Cada canal cuenta con 3 mini-motores. Primera columna muestra el número de canal. Segunda columna muestra el número de motor (de 1 a 3). Tercera columna muestra desplazado del punto central del motor actual. Cuarta columna muestra ángulos de espejo en las direcciones horizontales y verticales.

Pestaña CCD, contiene diferentes configuraciones CCD. Para obtener más información, se debe consultar: Configuración de la sección de la cámara. Ficha Mensaje necesitan sólo para fines de depuración. Por lo general, no es necesario comprobar esta ficha. Área entre la sección izquierda y la sección central es divisor. Puede arrastrar hacia la izquierda y la derecha para seleccionar el tamaño de la sección correspondiente.

2. Sección inferior.

La sección inferior, contiene barra deslizante protocolo. Cuando se acumulan imágenes, la información de protocolo de esta sección, ayudará a navegar entre los fotogramas. Se puede navegar usando tanto slider como escribiendo directamente el número de cuadro.

3. Sección superior.

La sección superior, contiene el menú principal de la aplicación y la barra de herramientas. Barra de herramientas contiene comandos útiles para la ejecución de

acciones utilizados más recientemente. Todos los comandos en el menú principal y la barra de herramientas se describen más adelante.

4. Sección principal.

La sección principal, contiene 4 cuadros con la información de la imagen de vista previa. Cada marco tiene la barra de herramientas y se desplaza adicionalmente. El tamaño de cada cuadro se calcula automáticamente cuando cambiamos el tamaño de la ventana principal o movemos el divisor principal. Sin embargo, se puede maximizar cada cuadro y se realizará en todo el tramo central. Todas las demás tramas se ocultarán.

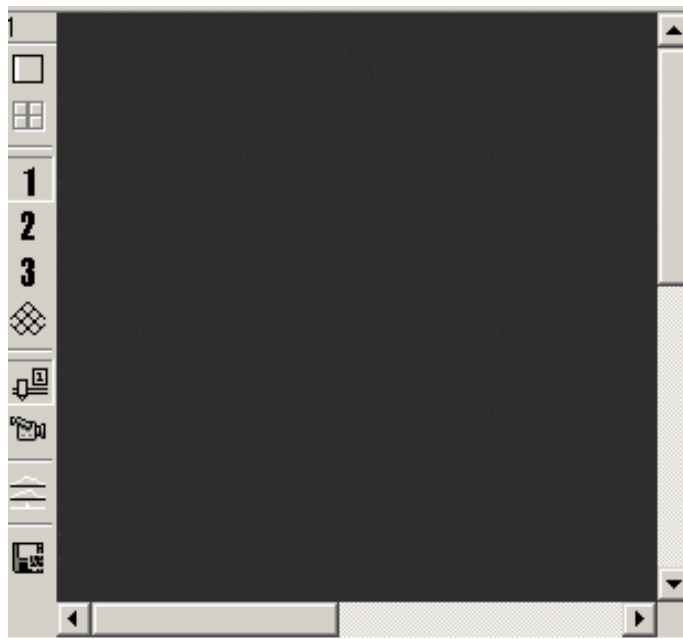


Figura C.3: Sección superior izquierda - Zona oscura.

4a. Sección superior izquierda - zona Oscura actual.

Valor actual Oscuro se mostrará en el borde superior izquierdo de la cada marco, Figura [C.3]. Para mostrar el valor corriente de oscuridad es necesario seleccionar el modo Live View o abra cualquier protocolo con los datos acumulados. Usted puede también preferencias de configuración para resaltar los valores actuales extremadamente grandes de oscuridad.

4b. Sección izquierda - la barra de herramientas local.

Esta barra de herramientas contiene comandos adicionales para gestionar marco. Estos comandos se pueden seleccionar también del marco del menú desplegable (Figura C.4).

4c. Previsualización de imagen.

Área principal si el cada cuadro contiene la imagen. El contenido de este campo depende de la configuración de la barra de herramientas locales vigentes.

Cuando se inicia la aplicación número de cuadro 4 (marco inferior derecho), contiene canales de vista previa. Se puede utilizar este marco para manejar la imagen actual. Se pueden usar los comandos siguientes:



Maximize current frame	
Menu:	Click right mouse button inside frame and select 'Maximize' command
Toolbar:	Press local toolbar button: 
Restore current frame position	
Menu:	Click right mouse button inside frame and select 'Restore' command
Toolbar:	Press local toolbar button: 
Zoom in / Zoom out image	
Keyboard:	To change zoom value for all four frames press Ctrl+Z and select required zoom value
Menu:	To change zoom value for all four frames: Select 'View' - 'Change zoom' command from the main application menu bar To change zoom value for current frame only: Click right mouse button inside frame and select 'Zoom in', 'Zoom out', 'Actual pixels' or 'Fit to window' commands
Toolbar:	To change zoom value for all four frames select zoom combobox in the main application toolbar
Mouse:	Zoom in: hold 'Ctrl' key and click inside the frame content Zoom out: hold 'Shift' key and click inside the frame content
Move image:	
Mouse:	Hold left mouse button inside frame and drag mouse. You can also use scroll bars in right and bottom area of the each frame to move image

Figura C.4: Comando para manipulación de la imagen.

Cuando uno de los marcos se maximiza, todos los marcos se ocultarán Todos los demás botones de esta barra de herramientas se describen en la sección Vista previa de vídeo en vivo.

El marco puede mostrar dos imágenes diferentes: vista previa del vídeo en directo o la información de protocolo. Estos modos se describen a continuación.

Para salir de la aplicación se selecciona 'File' - 'Exit' elemento de menú principal (en la barra de menú de la aplicación principal) o cerca de la aplicación mediante el menú del sistema. Si hay alguna aplicación de datos que no se han guardado, le preguntará si desea guardar.

§C.4. Configuración de la cámara

Para ajustar los parámetros de la cámara, se debe usar el botón de la sección izquierda:



Figura C.5: Opción para iniciar el ajuste de los parámetros de la cámara.

El cuadro de diálogo de configuración de la cámara contiene los elementos siguientes:

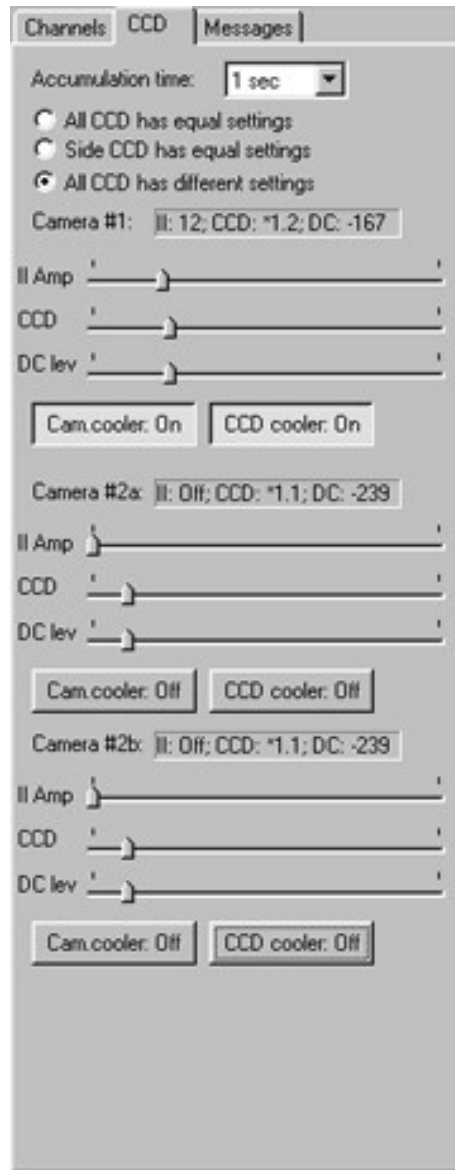


Figura C.6: Ventana para ajustar los parámetros de la cámara.

Tiempo de Acumulación: Se pueden seleccionar los siguientes tiempos de acumulación para todos los CCD:

25 Hz (fast mode, image depth - 8 bit)

1 seconds (slow mode, image depth - 12 bit)

3 seconds (slow mode, image depth - 12 bit)
8 seconds (slow mode, image depth - 12 bit)
16 seconds (slow mode, image depth - 12 bit)
32 seconds (slow mode, image depth - 12 bit)
64 seconds (slow mode, image depth - 12 bit)
128 seconds (slow mode, image depth - 12 bit)
192 seconds (slow mode, image depth - 12 bit)

Modo de configuración:

Se pueden seleccionar todos los lugares ajustes por debajo de los 3 cámaras, sólo para cámaras laterales, o todas las cámaras tienen diferentes ajustes. Seleccione uno de los botones de radio. Depende de la configuración de modo actual para CCD # 2b o 2a/2b CCD se desactivará.

Todos los demás ajustes son iguales para todas las cámaras:

II amplificación - seleccione amplificación intensidad de la imagen requerida. Cero de amplificación II significa que el sistema II está apagado.

Amplificación CCD - seleccione amplificación CCD necesario. Este coeficiente es el multiplicador

Lev DC - seleccionar el nivel de corriente de oscuridad - -300-300 mv.

Cam. enfriador - puede activar o desactivar el enfriador cámara

Cooler CCD - se puede activar o desactivar el enfriador CCD

Ajustes para CCD # 2a y CCD # 2b son los mismos. Amplificación II actual, la amplificación del CCD y el nivel de la corriente oscura se muestran en el área de estado (ver en la zona de cabecera de la cámara).

Se puede guardar y restaurar la configuración CCD actual. También se puede guardar la configuración por defecto del CCD estos valores se utilizarán cada vez que usted ha puesto en marcha la aplicación.

Se puede utilizar cooler CCD On / Off con el botón de comando para comprobar la conexión entre la aplicación y CCD. Si la conexión es válida se puede escuchar clics más frescas.

§C.5. Configuración de los canales

Para configurar propiedades de la cámara se usa la primera ficha de la sección de la izquierda:

C. CARACTERÍSTICAS Y FUNCIONES BÁSICAS DE LA CÁMARA DE VIDEO CCD CAM3
136



Save CCD settings to file	
Menu:	Select 'Camera' - 'Save camera parameters' command from the main application menu bar
Toolbar:	Press toolbar button: 
Load CCD settings from file:	
Menu:	Select 'Camera' - 'Load camera parameters' command from the main application menu bar
Toolbar:	Press toolbar button: 
Setup CCD settings by default:	
Menu:	Select 'Camera' - 'Setup current camera options as default' command from the main application menu bar

Figura C.7: Ventana para salvar la configuración deseada del CCD.

Select 'Channel Settings' Tab	
Keyboard:	Press Ctrl+1
Menu	Select 'Channels' tab from left section

Figura C.8: Ventana para iniciar la configuración de la cámara.

Cuadro de diálogo; Configuración de Canales, contiene los elementos siguientes:

Channels		CCD	Messages
Ch	#	Pos	Angles
1	1	0	H: 0.0000
	2	0	V: 0.0000
	3	0	
2	1	0	H: 0.0000
	2	0	V: 0.0000
	3	0	
3	1	0	H: 0.0000
	2	0	V: 0.0000
	3	0	
4	1	0	H: 0.0000
	2	0	V: 0.0000
	3	0	
5	1	0	H: 0.0000
	2	0	V: 0.0000
	3	0	
6	1	0	H: 0.0000
	2	0	V: 0.0000
	3	0	
7	1	0	H: 0.0000
	2	0	V: 0.0000
	3	0	
8	1	0	H: 0.0000
	2	0	V: 0.0000
	3	0	
9	1	0	H: 0.0000
	2	0	V: 0.0000
	3	0	
10	1	0	H: 0.0000
	2	0	V: 0.0000
	3	0	
11	1	0	H: 0.0000
	2	0	V: 0.0000
	3	0	
12	1	0	H: 0.0000
	2	0	V: 0.0000
	3	0	
13	1	0	H: 0.0000
	2	0	V: 0.0000
	3	0	
14	1	0	H: 0.0000
	2	0	V: 0.0000
	3	0	

Figura C.9: Ventana de diálogo para configuración de la cámara CCD.

El cuadro de diálogo de configuración de canal contiene $19 * 3 = 57$ puntos (3 posiciones de motor para 19 espejos). Puede seleccionar los motores necesarios y modificar los valores actuales.

Esta tabla contiene las columnas siguientes:

1. ID de canal. Puede ver el número de canales en el marco de la inspección previo - ver abajo.
2. número del motor
3. Posición actual del motor
4. Los ángulos horizontales y verticales para cada espejo

§C.6. Previsualización de video en vivo

El modo de vista previa de video en vivo le permite previsualizar las imágenes CCD recibido en tiempo de ejecución. Se recomienda este modo para ajustar la configuración de la cámara y las posiciones de los espejos. Para iniciar el modo de video de vista previa en vivo que necesita para empezar la acumulación de CCD.



Start CCD accumulation	
Menu:	Select "Camera" - "Start" from the main application menu bar
Toolbar:	Press main toolbar button 
Keyboard:	Press F5
Stop CCD accumulation	
Menu:	Select "Camera" - "Stop" from the main application menu bar
Toolbar:	Press main toolbar button 
Keyboard:	Preff Shift+F5

Figura C.10: Inicio de la grabación de la cámara CCD.

Para seleccionar Vista previa de video en directo:


Select live video preview	
Menu:	Click right mouse button inside frame and select 'Live Video' command
Toolbar:	Press local toolbar button: 
Select CCD Index to preview	
Menu:	Click right mouse button inside frame and select 'Camera #1', 'Camera #2' or 'Camera #3' commands
Toolbar:	Press local toolbar button: 1 , 2 , 3

Figura C.11: Inicio de la previsualización de la cámara CCD.

Se puede cambiar toda la configuración del CCD durante el modo de video en directo, salvo la preferencia temporal de acumulación. Para cambiar la preferencia de tiempo de

acumulación que usted tiene que parar en vivo de video de vista previa.

Turn off Live Video preview (select Protocol information)	
Menu:	Click right mouse button inside frame and select 'Protocol data' command
Toolbar:	Press local toolbar button: 

Figura C.12: Apagado de la previsualización de la cámara CCD.

Los siguientes mensajes se pueden mostrar en el área de fotogramas durante la vista previa en vivo de video:

Lectura de datos ... No se ha completado primer fotograma. Es necesario esperar unos segundos (depende de la cámara de tiempo de acumulación) para ver la primer trama.

Live Video ya utilizado No se puede navegar por las imágenes de CCD para el single CCD en diferentes marcos.

Tiempo de espera de lectura del CCD Cámara seleccionada no responde. Consulte la sección de configuración de hardware o de solución de problemas y la sección de errores para obtener más información.

CCD acumulación no se ha iniciado Enciendes Live Video vista previa sin acumulación CCD. Presione F5 para iniciar acumulación CCD.

Hay que tener en cuenta si se le indica "Live Video ya utilizada" de mensajes o "Tiempo de espera de lectura CCD" hay que reiniciar el modo de video en directo.

§C.7. Protocolos

El protocolo, es el archivo de la base que le permite gestionar datos CCD recibidos. Todas las tramas de todo CCD pueden ser almacenados en el archivo de protocolo para el procesamiento futuro. Cada protocolo general contiene dos archivos:

< nombre de protocolo de >. pro propiedades del protocolo, la informacin de configuracin CCD, comentarios de usuarios, etc

< nombre de protocolo de >. frm tramas recibidas

Tener en cuenta si se desea copiar, renombrar, borrar o informaci3n el protocolo de archivo en la que siempre debe funcionar con los archivos descritos anteriormente.

Para administrar los protocolos que puede utilizar el menú "Archivo" en la barra de menú de la aplicación principal. Este menú contiene comandos siguientes:





Create new protocol	
Keyboard:	Press Ctrl+N
Menu:	Choose 'File - 'New protocol' from the main application menu bar
Toolbar:	Press toolbar button: 
Open an existing protocol:	
Keyboard:	Press Ctrl+O
Menu:	Choose 'File - 'Open protocol' from the main application menu bar Most recently used protocols can be also opened from MRU section in the 'File' menu (between 'Protocol properties' and 'Exit' command)
Toolbar:	Press toolbar button: 
Save currently opened protocol:	
Keyboard:	Press Ctrl+S
Menu:	Choose 'File - 'Save protocol' from the main application menu bar
Toolbar:	Press toolbar button: 
Show/Change protocol properties	
Keyboard:	Press Ctrl+Enter
Menu:	Choose 'File - 'Protocol properties' from the main application menu bar
Toolbar:	Press toolbar button: 
Close currently opened protocol:	
Menu:	Choose 'File - 'Close protocol' from the main application menu bar

Figura C.13: Lista de comandos.

§C.8. Protocolo de acumulación de datos

Si ha creado el protocolo se puede acumular datos y guardarlos en el archivo de secuencias de protocolo. Antes de la acumulación de datos, se recomienda usar el modo de video de vista previa en vivo para calibrar los ajustes del CCD y de canal.

Start data accumulation:	
Menu:	Choose 'File - 'Start protocol data accumulation' from the main application menu bar
Toolbar:	Press toolbar button: 

Figura C.14: Inicio de acumulación de imagen

La siguiente ventana de diálogo será desplegada:

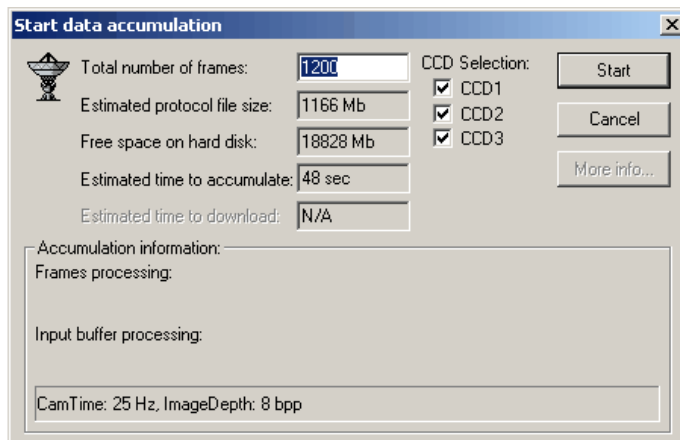


Figura C.15: ventana de captura de imagen.

Se puede seleccionar el número requerido de marcos y CCD correspondiente para acumular datos. El tamaño estimado del archivo (depende de la configuración de CCD, número de marcos y CCD seleccionado) se mostrará en la fila # 2.

El espacio total disponible en el disco actual se mostrará en lugar de # 3.

Tiempo estimado (depende de la configuración CCD) se mostrará en la fila # 24

Se recomienda acumular más fotogramas que las requeridas. Esto le permitirá manejar tramas de protocolo (por ejemplo, usted ser capaz de cortar las tramas defectuosas, etc.)

Al hacer clic en Aceptar, se procesarn las acciones siguientes:

Todos los fotogramas de video en directo que se utilizan actualmente se cancelarán

El protocolo estará preparado para la acumulación

Utilización comenzará acumulación CCD para las cámaras seleccionadas

Cuando todas las tramas se guardan correctamente en la aplicación interna del controlador CCD cancelar acumulación CCD

Todos los marcos necesarios se envían a la máquina local y se guardan la secuencia del protocolo.

Durante la acumulación puede ver la siguiente ventana de diálogo:

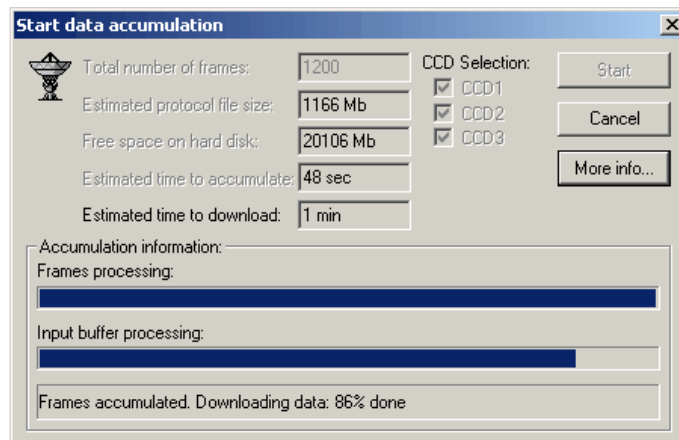


Figura C.16: Ventana de diálogo.

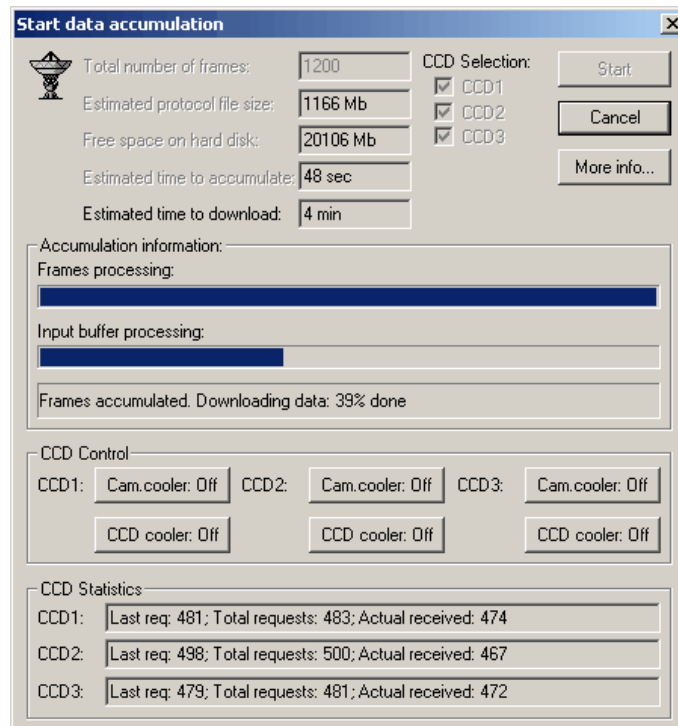


Figura C.17: Pantalla con información extendida sobre acumulación y controladores de enfriadores del CCD

Quando se acumulan todos los datos del protocolo se muestra en marcos. Puede navegar por los datos acumulados y gestionarlos.


Select protocol preview mode for the frame	
Menu:	Click right mouse button inside frame and select 'Protocol data' command
Toolbar:	Press local toolbar button: 
Select CCD to preview:	
Menu:	Click right mouse button inside frame and select 'Camera #1', 'Camera #2' or 'Camera #3' commands
Toolbar:	Press local toolbar button: 1 , 2 or 3
Select bottom section (select frame number to display)	
Keyboard:	Press Ctrl+G (goto frame number edit box) or Ctrl+L (goto frame slider)
Menu:	Select 'View' - 'Goto frame number' or 'View' - 'Goto frame slider' menu from the main application menu bar

Figura C.18: Cuando todos los datos sean acumulados, los datos del protocolo se mostrarán en la pantalla.

§C.9. Operaciones avanzadas

CCTVApplication, tiene funciones adicionales que le permite controlar y manejar los datos acumulados. Además puedes crear complementos personalizados para realizar tareas de filtración y exportar los datos a otros formatos de archivo (por ejemplo, el streaming de video avi, contenido XML, texto, archivos, imgenes de mapa de bits, etc.).

Se pueden diseñar nuevos filtros de carga y los plug ins de procesamiento de imágenes. Ver tema SDK de componentes para los detalles.

Cuando el comando de 'filtración' se llama el siguiente cuadro de diálogo que aparecerá Fig.C.19:

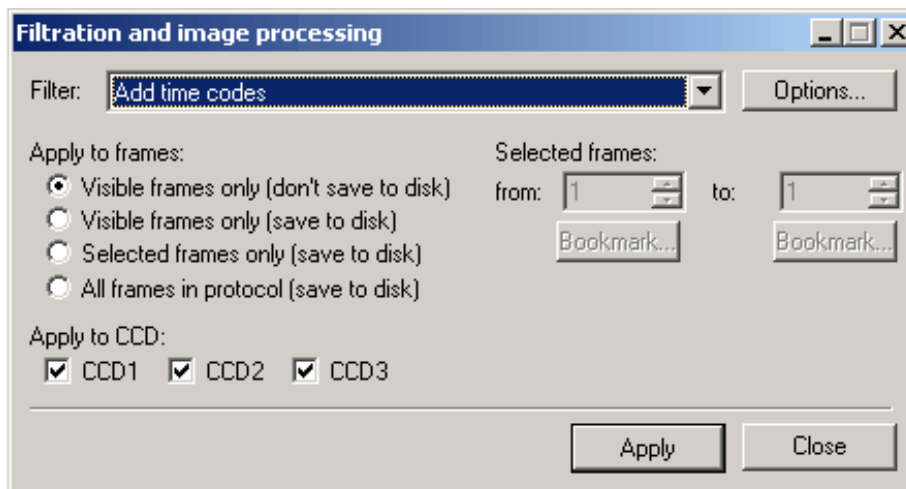


Figura C.19: Filtrado y procesamiento de imágenes.

Apéndice D

Bibliografía

Bibliografía

- [1] Beavers, W. I., Dudgeon, D. E., Beletic, J. W. and Lane, M. T. Speckle Imaging through the Atmosphere. The Lincoln Laboratory Journal. Volume 2. Number 2 (1989).
- [2] Dainty, J. C., and Fienup, J. R. "Phase Retrieval and Image Reconstruction for Astronomy." Image Recovery: Theory and Application. ed. Henry Stark (Academic Press. London. 1987). p. 231.
- [3] Fried, D. L. (1966). "Optical Resolution Through a Randomly Inhomogeneous Medium for Very Long and Very Short Exposures". Journal of the Optical Society of America 56 (10): 1372.
- [4] Higgs C., Ariel E.D., Player B. E., and Bradley L. C., III. "Adaptive-Optics Compensation through a High-Gain Raman Amplifier."Lincoln Laboratory Journal 2, 105 (1989).
- [5] Labeyrie, A. "Attainment of Diffraction-Limited Resolution in Large Telescopes by Fourier Analysing Speckle Patterns in Star Images." Astron. Astrophys. 6, 85 (1970).
- [6] McAlister, H. A. "High Angular Resolution Measurements of Stellar Properties." Annu. Rev. Astron. Astrophys. 23, 59 (1985).
- [7] Michel, R., Echevarría, J., Costero, A. R., and Harris, O. THE SEEING AT SAN PEDRO MARTIR OBSERVATORY AS MEASURED USING THE DIMM METHOD. RevMexAA (Serie de Conferencias), 19, 37-40 (2003)
- [8] Orlov, V. G., Voitsekhovich, V. V., Guerrero, C. A., ngeles, F., Farah, S. A., Luna, E., and Vzquez, R. R. SPECKLE INTERFEROMETRY AT THE OBSERVATORIO ASTRONMICO NACIONAL. III. Revista Mexicana de Astronoma y Astrofsica, 47, 211217 (2011)
- [9] Orlov, V. G., Voitsekhovich, V. V., Guerrero, C. A. SPECKLE INTERFEROMETRY AT THE OBSERVATORIO ASTRONMICO NACIONAL. IV. Revista Mexicana de Astronoma y Astrofsica, 48, 177181 (2012)

-
- [10] Orlov, V. G., Voitsekhovich, V. V. Mendoza-Valencia, G. A., Svyryd, A., Rivera, J. L., Ortiz, F., and Guerrero, C. A. SPECKLE INTERFEROMETRY AT THE OBSERVATORIO ASTRONMICO NACIONAL. I. *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofsica*, 45, 155-159 (2009)
- [11] Orlov, V. G., Voitsekhovich, V. V., Rivera, J. L., Guerrero, C. A., and Ortiz, F. SPECKLE INTERFEROMETRY AT THE OBSERVATORIO ASTRONOMIC NACIONAL. II *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofsica*, 46, 245251 (2010)
- [12] Orlov, V. G., Voitsekhovich, V. V., Snchez, L. J., and Garfias, F. First Speckle Interferometry Measurements of Binary Stars at the OAN-Tonantzintla. *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofsica*, 43, 137140 (2007)
- [13] Roddier, F., Gilli, J. M., and Verin, J., "On the Isoplanatic Patch Size in Stellar Speckle Interferometry," *J. Optics (Paris)* 13. 63 (1982).
- [14] Roddier, F. "Triple Correlation as a Phase Closure Technique." *Opt. Commun.* 60. 145 (1986).
- [15] Saha, S. K. High Resolution Imaging by Employing Passive and Active Approaches. Indian Institute of Astrophysics, Bangalore - 560 034, India.
- [16] Struve, Friedrich Georg Wilhelm von. : STF, Σ , STFA (primer apndice) STFB (2 apndice)
- [17] Voitsekhovich, V. V., Snchez, L. J., Orlov, V. G., Garfas, F., and Bentez, R. 2005, *RevMexAA*, 41, 399.