

**PRIMEROS RESULTADOS DEL ARREGLO CAARA
(CHARA). II. UNA DESCRIPCION DEL INSTRUMENTO.¹**

**T. A. ten Brummelaar, H.A. McAlister, S.T. Ridgway, W.G. Bagnuolo, Jr.,
N.H. Turner, L. Sturmann, D.H. Berger, C.E. Odgen, R. Cadman, W.I.
Hartkopf, C.H. Hopper, M.A. Shu**

2005, The Astrophysical Journal, Vol. 628, pags. 453 - 465

¹Artículo original *First Results from the Chara Array II. A Description of the Instrument*, escrito por T. A. ten Brummelaar, H.A. McAlister, S.T. Ridgway, W.G. Bagnuolo, Jr., N.H. Turner, L. Sturmann, D.H. Berger, C.E. Odgen, R. Cadman, W.I. Hartkopf, C.H. Hopper, M.A. Shure 2005, The Astrophysical Journal, Volúmen 628, página 453 - 465. Traducción al Español por José Antonio García Barreto y Tula Bernal Marín , Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México (IA-UNAM), México, D.F. Febrero 2007.

RESUMEN

CAARA (CHARA) es un arreglo interferométrico óptico/IR que consta de seis telescopios de 1 m, localizado en Mount Wilson, California, diseñado y construido por el Centro de Astronomía de Alta Resolución Angular (CAARA) de la Universidad Estatal de Georgia, Georgia State University, en los Estados Unidos de Norteamérica. En este artículo describimos los elementos principales de los sistemas de control del hardware y software del Arreglo, así como los métodos de reducción de datos que se usan actualmente. Nuestros planes para mejoras en un futuro cercano también se describen.

Temas principales: Efectos atmosféricos - Instrumentación: Alta resolución angular - Instrumentación: Interferómetros - Técnicas: Alta resolución angular - Técnicas: Interferométricas - Telescopios

1. INTRODUCCION

El Centro para Astronomía de Alta Resolución Angular, CAARA (en inglés CHARA: Center for High Angular Resolution Astronomy) de la Universidad Estatal de Georgia, Georgia State University, en los Estados Unidos de Norteamérica, ha diseñado y construido un arreglo interferométrico óptico/cercano-IR en los terrenos del Observatorio de Mount Wilson. Este es el segundo de dos artículos que tratan del Arreglo CAARA (CHARA). Los primeros resultados científicos se presentaron en el Artículo 1 McAlister et al. (2005) de esta serie, mientras que en este artículo se da la información técnica y lo que hay detrás del funcionamiento del instrumento.

El Arreglo CAARA (CHARA) consiste de seis telescopios ópticos, de 1 m de apertura, ubicados en una configuración en forma de Y, flexible en 15 líneas de base que van de 34 a 331 m, así como 10 posibles medidas con todas las antenas en fase. Esto permite resoluciones límite para mediciones de diámetros estelares, definidas en forma conservadora en términos de alcanzar el primer cero en la función de visibilidad, de 1.6 y 0.4 msa (milisegundos de arco) en las bandas K y V, respectivamente.

Los elementos principales del Arreglo consisten de los telescopios colectores de luz, los tubos al vacío que transportan el haz de luz, los sistemas de manejo de las líneas de

compensación de la longitud de la trayectoria óptica, y los sistemas de combinación del haz. Superpuesto a todos estos elementos está un sistema de alineación del haz y, claro, un sistema de control global. En este artículo describimos los subsistemas principales del Arreglo, incluyendo el sistema de control y la metodología de reducción de datos. Información técnica más detallada puede encontrarse en algunas de nuestras publicaciones previas ten Brummelaar et al. (2000), ten Brummelaar et al. (2003), McAlister et al. (2004), así como en numerosos reportes técnicos internos disponibles en el sitio Web de CHARA.²

2. LOCALIZACION DEL ARREGLO

El Arreglo está localizado en los terrenos del Observatorio de Mount Wilson justo al norte de Los Angeles, California. Este observatorio bien conocido, administrado por el Instituto Mount Wilson³ bajo el acuerdo con la Institución Carnegie de Washington, es también el sitio de otros experimentos de alta resolución angular tales como el Interferómetro Espacial Infrarrojo de Berkeley Hale et al. (2000), que trabaja a $10 \mu\text{m}$, el Sistema de Mejoramiento de Resolución Angular de la Universidad de Illinois Thompson, & Teare (2002), un programa de estrella guía láser. Investigación activa continúa también en el telescopio Hooker de 2.54 m y en las torres solares de 18 y 45 m de altura.

Lugares alternativos en Arizona y Nuevo México fueron considerados para el Arreglo CAARA (CHARA), pero finalmente se escogió Mount Wilson en base a su reputación de tener una excelente vista astronómica Buscher (1993), Buscher (1994), el gran número de noches despejadas, y los ventajosos costos y aspectos logísticos que significa la infraestructura existente. La contaminación luminosa de la ciudad de Los Angeles tiene un efecto despreciable en el potencial del Arreglo debido al campo de visión extremadamente pequeño del instrumento. No hemos detectado otra señal de vibraciones en el lugar además de las causadas por nuestros propios compresores de aire acondicionado y los trabajos de construcción ocasionales en ó cerca de la montaña Turner, & Eckmeder (1997).

²Ver <http://www.chara.gsu.edu/CHARA/techreport.html>.

³Ver <http://www.mtwilson.edu>.

3. CONFIGURACION DEL ARREGLO EN MOUNT WILSON

El Arreglo CAARA (CHARA) está construido como una configuración no redundante, en forma de Y, de líneas de base con dos telescopios localizados a lo largo de cada uno de los tres brazos del interferómetro. Un gran problema que se atendió fué el tener el menor impacto en las estructuras existentes y en los árboles a lo largo de los brazos del Arreglo, tanto como fuera posible, y mientras que algunos caminos de trabajo fueron requeridos, ninguna estructura existente y sólo un puñado de árboles tuvo que ser removido para colocar el Arreglo en la montaña. La Figura 1 muestra dos perspectivas de la montaña. Una es el modelo de computadora de la montaña desarrollado a principios del proyecto ten Brummelaar (1996b) para ayudarnos a colocar el Arreglo. Este modelo incluye todos los caminos existentes, construcciones y árboles, y nos permitió experimentar con varias posiciones para los telescopios, construcciones y postes de luz, y estudiar nuestro impacto en la montaña. La segunda parte de la Figura 1 muestra una fotografía de la construcción como estaba en el 2000. Todas las seis cúpulas y la instalación central de síntesis del haz son visibles en esta imagen, así como los tubos al vacío para el haz de luz de los brazos este y oeste del Arreglo.

Una lista de todas las líneas base disponibles se encuentra en la Tabla 1, y la Figura 2 muestra la cobertura *uv* de los seis telescopios por 3 hr en cualquiera de los lados de tránsito para las declinaciones de -15° , $+30^\circ$ y $+75^\circ$.

4. PERSPECTIVA DE LAS INSTALACIONES

Hay cinco componentes primarias de las instalaciones del CAARA (CHARA) en Mount Wilson: los telescopios y sus estructuras, los tubos al vacío que transportan el haz de luz y sus estructuras de montaje y alineación, el edificio central de síntesis del haz y línea de compensación, el cuarto/oficina de control, y un pequeño taller. Cada uno de estos se discutirá por separado en las siguientes secciones, excepto por el cuarto ú oficina de control, el cual es de una construcción estándar, y el taller, el cual hace uso de un edificio existente en la montaña que originalmente servía como el laboratorio de la línea de compensación y combinación del haz para el Interferómetro Mark III Shao et al. (1988).

Fig. 2.— Líneas de base disponibles

Telescopios	Este (m)	Norte (m)	Altura (m)	Línea de base (m)
S2-S1	-5.748	33.581	0.644	34.076
E2-E1	-54.970	-36.246	3.077	65.917
W2-W1	105.990	-16.979	11.272	107.932
W2-E2	-139.481	-70.372	3.241	156.262
W2-S2	-63.331	165.764	-0.190	177.450
W2-S1	-69.080	199.345	0.454	210.976
W2-E1	-194.451	-106.618	6.318	221.853
E2-S2	76.149	236.135	-3.432	248.134
W1-S2	-169.322	182.743	-11.462	249.392
W1-E2	-245.471	-53.393	-8.031	251.340
W1-S1	-175.071	216.324	-10.818	278.501
E2-S1	70.401	269.717	-2.788	278.767
E1-S2	131.120	272.382	-6.508	302.368
W1-E1	-300.442	-89.639	-4.954	313.568
E1-S1	125.371	305.963	-5.865	330.705

NOTAS.- Estos números están basados en los resultados de un ajuste a la línea de base global de mediados de 2004. La desviación estándar de este proceso fue 1891 μm .

4.1. Los telescopios colectores de luz

Cada uno de los seis telescopios, de 1 m de diámetro de apertura, es un reductor afocal de haz tipo Mersenne, el cual manda el haz en una salida de 12.5 cm de diámetro a los tubos transportadores al vacío Barr, Gerzoff, & Ridgway (1995). La óptica primaria y secundaria fueron fabricadas y acopladas en LOMO en St. Petersburg, Rusia, bajo un contrato con la Telescope Engineering Company de Golden, Colorado. Los substratos para el espejo primario y el secundario acoplados son de Sital de bajo coeficiente térmico de expansión (CTE) y Zeroduro, respectivamente. La rugosidad típica del espejo primario es de 0.035λ de desviación estándar (en inglés *root mean square, rms*) a 633 nm [$\sim \lambda/30$], y como el secundario y el primario son conjuntos acoplados, el funcionamiento combinado del sistema del telescopio excede esta especificación Bagnuolo (1996). Un séptimo conjunto acoplado ha sido fabricado para el CAARA (CHARA) en St. Petersburg. Esta óptica es una inversión hacia un futuro séptimo telescopio, así como repuesto que podría cubrir el retraso debido a recubrimientos periódicos de la óptica existente.

CAARA (CHARA) encargó un diseño de montura de telescopio común al Sr. Larry Barr. El diseño es una montura alt-azimuth estilo horca con extracción del haz tipo coudé por siete espejos. De un lado de la horquilla, el haz del telescopio está disponible a varios metros en un espacio colimado disponible para adquisición de futura corrección de óptica adaptativa. Las monturas son excepcionalmente rígidas y pesadas (10,455 kg), para estabilidad interferométrica y para incorporar una viga de medición Invar para que el foco del telescopio no sea sensible a la temperatura. Esto da una muy alta estabilidad del foco de los telescopios, el cual permanece alineado por más de un año sin la necesidad de ajuste. La celda del espejo primario utiliza un soporte radial central y ramificaciones en 18 puntos, mientras que el soporte secundario son actuadores para control de movimiento lateral (en inglés *tip/tilt*; ten Brummelaar (1996a)). M3 Engineering and Technology Corporation, de Tucson, fabricó y ensambló las monturas. Un modelo DAC del diseño del telescopio se encuentra en la Figura 3, mientras que la Figura 4 muestra un telescopio real. Ridgway & McAlister (2003) y Sturmman et al. (2003b) dan descripciones más detalladas de los telescopios CAARA (CHARA).

El movimiento del telescopio y el apuntado están controlados usando ComSoft TCS⁴ complementado con un programa de computadora de modelo de apuntado de T-puntos para obtener precisiones típicas de 20'' de desviación estándar. Una cámara CCD localizada en el puerto Nasmyth provee de alineación al laboratorio central, así como la adquisición inicial de estrellas Sturmann (1998). El espejo secundario tiene un pequeño hueco en forma de cubo en el centro para que un láser de alineación mapuntando fuera del laboratorio pueda ser visto también en el sistema de adquisición. Esto asegura que hacia donde apunta el telescopio y la alineación del laboratorio, coincidan. Cada telescopio tiene también un telescopio buscador de campo amplio y varias cámaras pequeñas de vigilancia para monitorear el telescopio y su estructura.

Los mecanismos del telescopio son motores servo DC de Parker/Compumotor⁵. Estos fueron seleccionados con la esperanza de que ellos dieran un movimiento muy suave y se siguieran comportando como motores de pasos desde un punto de vista de control. En los trabajos iniciales en el telescopio se encontró que los mecanismos tenían una pequeña oscilación, por debajo de 1 Hz, la cual originalmente se pensó que era causada por el diseño del mecanismo. Después de rediseñar estos mecanismos, encontramos que la oscilación todavía estaba ahí. Se descubrió más tarde que era debida a un pobre ajuste del sistema servo a los motores del mecanismo, así que regresamos al diseño mecánico original.

Adjunto a los mismos telescopios se encuentra un sistema de control diseñado y construido para CAARA (CHARA), denominado ADministrador de TElescopio [ADTE](en inglés *TElescope MAnager*). ADTE controla todas las tapas de los telescopios, cámaras, y aparatos de alineación en la cúpula, y también provee de una interface local al software de control del telescopio. Un control manual local permite al operador controlar el telescopio y la cúpula desde dentro de la estructura, así como ajustar los espejos remóticamente en el laboratorio de síntesis del haz para alinear el eje de compensación óptica del haz, al eje del haz del telescopio.

Los telescopios están montados en pesados pedestales con un área coudé debajo donde el haz extraído es compensado por polarización y dirigido al laboratorio central. Las estructuras

⁴Ver <http://www.comsoft-telescope.com>

⁵Ver <http://www.parker.com>

que lo rodean son estructuralmente independientes de los pedestales del telescopio, con anillos inferiores y superiores que soportan un par de paredes cilíndricas concéntricas que se abren arriba y abajo para su acceso y ventilación. Las paredes proveen de un flujo libre de aire de 360°, el cual suprime exitosamente la contribución adicional a la resolución angular debida a la cúpula a pesar de las condiciones típicas de baja velocidad del viento en Mount Wilson. La estructura de los telescopios incorpora domos de 5m de diámetro (entregados por Ash Manufacturing con rendijas extra anchas) esclavas al movimiento de azimuth del telescopio. El principal contratista de CAARA (CHARA) en Mount Wilson, Sea West Corporation, de San Dimas, California ⁶, sugirió este diseño original de cilindros concéntricos. Toda la estructura y las funciones del telescopio son operables remotamente Hines, & ten Brummelaar (2002), y toda la electrónica de control del telescopio y de la estructura, excepto ADTE, está localizada en un cuarto adyacente de block de cemento para evitar la producción de calor dentro de la estructura que encierra a los telescopios. La Figura 5 muestra la estructura y el cuarto de la electrónica para el telescopio E2.

Los seis telescopios están en su lugar con toda la óptica instalada y alineada, y todos los telescopios están en operación interferométrica regular. No es necesario visitar a los mismos telescopios bajo condiciones normales de alineación, operación, ni para cerrar el Arreglo. El último telescopio asignado en modo interferométrico entró en función en Noviembre de 2003, y subsecuentemente el Arreglo ha estado observando cada noche.

4.2. Tubo al vacío para transporte del haz de luz

Se requieren siete redireccionamientos para dirigir el haz de salida de cada telescopio a la instalación central de combinación del haz, con 7 espejos ubicados en una caja coudé debajo del telescopio. Para preservar la simetría de polarización alrededor de los tres brazos del arreglo en Y, uno o dos espejos adicionales, dependiendo del brazo del Arreglo, se encuentran en esta caja. La Figura 6 muestra el esquema de estos grupos de espejos. Estos reflejos extra de luz se requieren por la naturaleza tridimensional del esquema en la montaña. De esta forma la simetría óptica se mantiene en todos los brazos del interferómetro Traub (1988),

⁶Ver <http://www.seawestinc.com>

Ridgway & Bagnuolo (1996)). No hemos encontrado evidencia de efectos de polarización anómalos en los datos del cielo. La óptica coudé manda la luz a través de una ventana óptica a un tubo al vacío para transportarla al centro del Arreglo. Tubería de aluminio con un diámetro exterior de 20 cm lleva los haces de luz de 12.5 cm de diámetro. Se utilizan mangas de neopreno cada 9.15m para la unión de esta tubería, una técnica que fue usada primero por Michelson en sus experimentos de la velocidad de la luz en Mount Wilson y que también es usada efectivamente en otros interferómetros.

Cada telescopio tiene su propio tubo al vacío Ridgway et al. (2000) así que cada brazo del Arreglo CAARA (CHARA) alimenta dos tubos paralelos hacia el centro. El terreno es tal que los tubos tuvieron que elevarse en algunos lugares hasta 10 m sobre el nivel local del suelo. Postes para soporte vertical sirven para alineación y expansión térmica. Operación al vacío no se requiere para medidas interferométricas en las bandas del cercano IR, pero provee de una mejor calidad de la imagen, especialmente a principios de la noche. Desde mediados del 2004, todo el tiempo de operación en la noche tiene lugar con el sistema al vacío. La bomba de vacío está aislada de cualquier vibración externa, y es posible operar la bomba mientras se está observando y mantener el vacío a 0.5 torr o menos durante la noche.

4.3. Edificio Central para la Síntesis del Haz y de la Línea de Compensación

Las líneas de compensación, los subsistemas de manejo del haz, y los subsistemas de combinación del haz están ubicados en el edificio central de síntesis del haz, ECSH, (por sus siglas en inglés BSF: Beam Synthesis Facility), un edificio en forma de L cuya dimensión mayor de 94 m aloja las líneas de compensación mientras que la parte más corta de la L consta del laboratorio de combinación del haz, LCH (su siglas en inglés serían BCL: Beam Combination Laboratory). El ECSH es una “edificio dentro de un edificio” donde la *envoltura* entre las construcciones interior y exterior sirve como recinto de calefacción y de aire acondicionado. Esto mantiene los 1000 m² de espacio de laboratorio a temperatura razonablemente constante y uniforme. Los cimientos y estructuras básicas de los dos edificios, interior y exterior, no están estructuralmente conectadas, para minimizar la transmisión de vibración, y bloques de concreto de 61 cm de espesor debajo de las mesas ópticas y soportes de riel proveen la estabilidad a las tolerancias interferométricas para todas las componentes

ópticas.

4.3.1. Compensación de la Longitud de Trayectoria Óptica

Mantener la diferencia de cero en la longitud de trayectoria óptica es el mayor problema para un interferómetro óptico con líneas base de cientos de metros. Esto se logra en el Arreglo CAARA (CHARA) en dos etapas con un arreglo sobre-y-debajo. La primera etapa ocurre todavía en el vacío, con seis sistemas de tubos paralelos (referidos como “Pipes of Pan” (Palitos de Pan) ó PoPs; Ridgway, ten Brummelaar, & Bagnuolo (1994)) haciendo ensambles con intervalos fijos de compensación de 0, 36.6, 73.2, 109.7 y 143.1 m que alimentan un espejo dentro del haz para reflejarlo hacia un sistema de periscopio que trae el haz dentro de la parte continua del sistema de compensación. Los haces entrantes de los tres brazos del Arreglo son alimentados dentro de los tubos paralelos PoP’s por espejos en grandes “cajas de desviación” que también sirven para completar el requerimiento de simetría en la polarización. A lo largo de cada línea PoP hay espejos que pueden ser movidos dentro del haz para añadir, o quitar, cantidades fijas de compensación. Al final de cada línea PoP está un espejo estacionario “final” que representa el retraso estático más largo posible disponible en el sistema. Una vez a la salida de los PoPs, los haces dejan el vacío y son dirigidos a las líneas continuas de compensación por un par de espejos de periscopio.

El retraso continuamente variante lo proporcionan los equalizadores de longitud de trayectoria óptica, ELTO, (sus siglas en inglés OPLEs: Optical Path Length Equalizers), un diseño de mediados de generación entregado a CAARA (CHARA) bajo un contrato con el Laboratorio de Propulsión a Chorro de la Agencia Espacial Norteamericana (JPL de la NASA) en la cadena evolutiva desde el Interferómetro Mark III hasta el Interferómetro Keck Colavita, Wizinowich, & Akeson (2004). Los ELTOs no están en el sistema al vacío e incorporan un arreglo de ojo de gato, en el cual un haz de entrada se refleja de un lado de la parábola, se enfoca en un secundario pequeño, regresa al otro lado de la parábola, y entonces, recolimado, es reflejado paralelamente al haz entrante (original). Cada carro avanza sobre un par de rieles de acero cilíndricos de 46 m de longitud alineados con precisión. Un sistema servo de 4 filas concéntricas, con alimentación de una unidad de láser, provee de 92 m de longitud (de camino) de compensación, con una desviación estándar menor que 20 nm, y

típicamente igual que 10 nm. Todos los 24 Pops, seis espejos finales, y los seis carros ELTOs están instalados y operando rutinariamente.

4.3.2. Manejo del Haz

Siguiendo la compensación de la longitud de trayectoria en los subsistemas PoP/ELTOs, los haces de luz emergentes de 12.5 cm son reducidos a un diámetro final de 1.9 cm usando un telescopio reductor de haz, TRH (sus siglas en inglés BRT: Beam Reducing Telescope) de dos elementos. Los haces reducidos pasan luego a través del subsistema corrector de dispersión longitudinal, SCDL (en inglés LDC: Longitudinal Dispersion Corrector) que corrige por la diferencia de las trayectorias en aire entre dos haces salientes, como resultado de que los telescopios no están a la misma elevación, y además corrige por la parte en la cual la trayectoria óptica no está en el vacío (Berger (2004); Berger et al. (2003)). El sistema de muestreo del haz, SMH (en inglés BSS: Beam Sampling System) es la etapa final del manejo del haz. El SMH usa una rendija dicórica para el haz y un espejo plano para separar la luz visible de la luz infrarroja en la frontera de $1\mu\text{m}$ y luego manda los dos haces a 90° a lo largo de trayectorias paralelas a los combinadores de haz visible e IR. Cada ensamble SMH se mueve con tal precisión que también sirven como un sistema de interruptores para seleccionar pares de líneas base que serán dirigidas a los combinadores de haz.

Como con la mayoría de los subsistemas en el Arreglo, estamos trabajando continuamente para mejorar el sistema de manejo del haz. Aún así, todos los seis trenes de haz de luz están completos y en funcionamiento, y todos los telescopios y trenes de haz han sido usados para interferometría y están disponibles para realizar ciencia. La Figura 7 muestra una foto del área de la línea de compensación y manejo del haz.

4.3.3. Combinación del haz

Actualmente el LCH aloja cinco mesas ópticas basadas en la funcionalidad de los subsistemas. Estas mesas contienen el combinador del haz visible, el combinador del haz infrarrojo, un láser de HeNe para producir una estrella artificial y alineación y una fuente de luz blanca para generación interna de franjas, detectores para las franjas y movimiento lateral, y un

combinador de haz hecho de fibra (Coudé du Foresto et al. (1997), Coudé du Foresto et al. (2003)) resultante de una colaboración con el Observatorio de París.

Al momento de escribir, toda la combinación del haz en el Arreglo CAARA (CHARA) ha sido restringida a sistemas de dos haces. Futuras actualizaciones en 2005 incluirán tres maneras de combinar el haz en aire capaz de medir tres líneas base y una sola con los telescopios en fase. Ya se están realizando pruebas de un combinador de haz de fibra de cuatro a seis modos de combinación, que ha sido diseñado y construido por John Monnier en la Universidad de Michigan Monnier et al. (2004): A finales de 2004, Monnier y colaboradores consiguieron un nuevo apoyo económico de la Fundación Nacional de la Ciencia (en inglés National Science Foundation) en la Universidad Estatal de Georgia (en inglés Georgia State University) y al Centro de Ciencia Michelson (en inglés Michelson Science Center), para financiar un monitor de franjas de seis modos para el IR. Esperamos que el diseño detallado y la construcción de este sistema comience en 2005.

Se decidió a principios de la fase de diseño del Arreglo CAARA (CHARA) separar las funciones del monitoreo de las franjas y de la medición de su amplitud y fase ten Brummelaar, & Bagnuolo (1994). De esta forma, cada sistema puede ser optimizado para un u otro funcionamiento y el desarrollo de varios combinadores de haz puede realizarse en paralelo. Estamos explorando varios métodos de monitoreo de franjas, incluyendo mecanismos de paquetes donde se puede mantener el paquete de franja centrado en un gran explorador, agrupado con el monitoreo de compensación donde se mantiene el centro del grupo de compensación en posición y en fase fija donde uno monitorea sobre una sola franja. Se espera que los tres métodos sean usados bajo diferentes condiciones y diferentes enfoques de la ciencia. Por ejemplo, será posible tener anclada la fase usando el sistema IR y mandar un haz en fase al combinador de haz visible. Lo contrario será también posible por supuesto. Así mismo también será posible dividir los seis telescopios entre varios combinadores de haz y de este modo crear interferómetros separados trabajando en paralelo.

Dos CCDs de alta velocidad han sido adquiridos del Astronomical Research Cameras de San Diego para uso en el área de combinación del haz visible, uno para el combinador del haz en la banda I y R y uno para la detección lateral. También hemos adquirido un acoplador de fibra que rompe la apertura completa en siete aperturas más pequeñas y acopla cada una de ellas a una fibra multimodal. El haz central incluye lo que se oscurece por el telescopio

secundario y es por lo tanto usado primeramente para el alineamiento. Esto nos permite tener siete pequeños (30 cm en el cielo) sistemas de apertura alimentando una rendija de fibra en el espectrógrafo de baja resolución y procesar todos los siete sistemas en paralelo Ogden, ten Brummelaar, & Sturmman (2003). La construcción de este sistema de luz visible está en progreso, y esperamos lograr la primera franja en el cielo a finales de 2004.

Un espectrógrafo de alta resolución espectral está también en construcción y usará las mismas subaperturas y fibras Hillwig, Bagnuolo, & Riddle (2002). Este espectrógrafo está pensado para combinar mediciones de altas resoluciones espacial y espectral. El espectrógrafo es un Ebert-Newtoniano modificado basado en el diseño usado para el telescopio Georgia State Multi-Telescope Barry, Bagnuolo, & Gies (1994). Es alimentado por fibras y producirá espectros coherentes, resueltos espacialmente. El uso de este espectrógrafo en el cielo está retrasado hasta que sea posible entrar en fase con el Arreglo CAARA (CHARA), y los haces en fase puedan ser mandados dentro del sistema. Esto podría ser posible a finales de 2005.

La segunda cámara está siendo probada como una mejora de detección lateral. En lieu de un combinador de haz de luz visible completo, el canal visible corto de 600 nm es usado por completo en el presente para detección lateral basada en fotomultiplicadores, para la cual la magnitud límite de ancho de banda más alta es $V=+9.5$ a tiempos muestra de 10 ms, aunque en buenas condiciones de resolución que permiten el uso de tiempos de integración largos, podemos tener objetos tan débiles como $V=+12.0$. Este proyecto de detección lateral y algoritmos de corrección están basados ampliamente en el sistema desarrollado en el Interferómetro Estelar de la Universidad de Sydney (por sus siglas en inglés SUSI: Sydney University Stellar Interferometer; ten Brummelaar, & Tango (1994)). Luz de 600 nm a 1 μm está dividido en un CCD aumentado, permitiendo inspección de la calidad de la imagen y alineación, y el espectrógrafo de baja resolución es usado para la interferometría para las bandas I y R. Las fuentes del láser boresight y de luz blanca son usadas regularmente para tareas esenciales de alineación y finetuning del sistema en general. El ICCD también nos proporciona una posición de referencia que define el eje óptico del interferómetro, y nosotros regularmente alineamos los detectores laterales para asegurar que las imágenes estelares de cada telescopio vivan en este eje óptico.

La salida del combinador actual del haz IR, llamado “CAARA (CHARA) Classic”, es un simple combinador de haz pupil-plane Sturmman et al. (2003a). Las dos salidas del

divisor de haz son dirigidos a dos sitios de la cámara de combinación del haz (se describe más abajo), con franjas que se detectan a modo de escaneo dado al oscilar un espejo montado a una etapa de translación piezoeléctrica. La etapa de translación piezoeléctrica se inicia con una señal tipo sierra simétrica cuya respuesta a una señal de manejo dada es mapeada con un interferómetro de láser para dar una razón de adquisición de datos de 1 kHz, correspondiente a cinco muestras por franja a la frecuencia típica de franjas de 200 Hz. Razones de muestra de 250, 500 y 750 Hz son también posibles. La magnitud límite K común para detección de franjas con este sistema es $K=+6.5$ para visibilidades primarias de 0.50.

Este sistema también es capaz de fases IR cerradas, las cuales han sido logradas exitosamente en el laboratorio, con el acierto del sistema trabajando en luz estelar en 2005. Esto mejorará a través de poner una muestra cada 0.5 s a 80 muestras s^{-1} y por último proveer la habilidad de movimiento de las franjas en la banda H con “CAARA (CHARA) Classic” y ganar varias magnitudes en la banda K usando el combinador de haz de fibra descrito arriba. También será posible cerrar fases en una de las bandas IR para proveer haces en fase para ambos espectrógrafos visibles de baja y alta resolución.

En nuestro método actual para escanear franjas el tiempo muestra máximo es de 4 ms; sin embargo, con el nuevo método para cerrar fases es posible incrementar esto a 20 ms o más. Además, todas las superficies de los espejos están cubiertas con Al, y los fondos sobrantes del proyecto proveen de mejoras a un número de espejos en el vacío o en ambientes protegidos, con cubiertas de plata. Nuestros cálculos muestran ? que cubiertas de plata doblarán la salida del IR cercano y la ganancia esperada en el rojo visible es mucho mayor. Este y otros pasos se espera que incrementen la sensibilidad a $K=+9.0$.

A través de una colaboración con el Paris Observatory, un segundo combinador de haz ha sido instalado en el Arreglo CAARA (CHARA). La Unidad para la Recombinación Óptica unida por Fibras [UROUF) (en inglés Fiber-Linked Unit for Optical Recombination, FLUOR) ha estado en uso en el interferómetro IOTA en Mount Hopkins desde 1995, e.g. Perrin et al. (1999). La característica especial de UROUF (FLUOR) es que incorpora fibras ópticas como filtros espaciales y un cruce de fibra en forma de X como elemento de interferencia, en vez del dispersor de haz. La combinación de filtrado espacial con monitoreo fotométrico subsecuente de las intensidades del haz, permite a este instrumento medir visibilidades de brillo de los objetos con precisiones mejores que 1%. UROUF (FLUOR) es una

herramienta clave para problemas tales como medidas de precisión de la pulsación de estrellas variables, formas estelares de la secuencia principal y estrellas anteriores a la secuencia principal, Δm binarios grandes, y determinación del limbo oscuro a través de mediciones más allá del primer cero en la función de visibilidad que requieren de tal precisión. El combinador de haz UROUF (FLUOR) ha sido usado regularmente en el cielo desde principios de 2003.

4.3.4. Cámara del Combinador del Haz IR

El corazón del combinador de haz infrarrojo es un arreglo PICNIC Rockwell 256x256 HgCdTe con pixeles de $40 \mu\text{m}$ que poseen eficiencias cuánticas mejores del 60% en el régimen espectral de 1-2.3 μm . La cámara Near InfraRed Observer (NIRO) del CAARA (CHARA) fue construida en Georgia State con la asistencia de Wes Traub y Rafael Millan-Gabet del Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics. De esta manera NIRO es muy similar a la cámara usada en el interferómetro IOTA (Millan-Gabet et al. (1999) y Pedretti et al. (2004).

El arreglo PICNIC es sensible a la luz a longitudes de onda de 0.8-2.5 μm y está estructurado eléctricamente como cuatro cuadrantes de 128x128, cada uno con su propio amplificador de salida; NIRO está cableado para leer sólo un cuadrante. El control del arreglo y la adquisición de datos están controlados por una tarjeta digital I/O en una PC y una caja interface de construcción común contiene una tarjeta de manejo de reloj que provee de los niveles de bias DC para el arreglo, y una tarjeta convertidora de analógico a digital (ADC: Analog-to-Digital Converter). La entrada de la tarjeta ADC es la señal de salida analógica del arreglo, amortiguada por un preamplificador 20x de bajo ruido montado en el interior de la Dewar lid (operando a temperatura cercana a la del cuarto). El ADC es una unidad de 16 bits capaz de 100 kiloseñales s^{-1} .

El arreglo PICNIC está montado en dos Laboratorios Infrarrojos HDL-5 Dewar modificados para uso con nitrógeno líquido en ambos contenedores criogénicos. El vacío en el Dewar se mantiene mejor que 10^{-8} torr por una combinación de sieves moleculares y una pistola de iones, resultando en un tiempo de tolerancia del Dewar de 22 hr. Un espejo parabólico a 60° fuera del eje enfoca los dos haces colimados de interferencia en dos regiones del arreglo después de pasar a través de una ventana de vacío fused silica y un filtro enfriador. La

rueda de filtro puede girarse manualmente y sostener a seis filtros. Normalmente, sostiene los filtros de banda K' y H, así como a varios filtros de banda estrecha dentro de la banda K.

5. SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control del Arreglo está basado en Linux de tiempo real excepto por el subsistema ELTO, el cual fue desarrollado por JPL y trabaja bajo la plataforma de cómputo VxWorks, y el combinador de haz UROUF (FLUOR), el cual utiliza Labview. El sistema de control es completamente operacional aunque está sujeto frecuentemente a actualizaciones y se ganan mejoras conforme la observación y experiencia.

El modelo de control consiste de varias etapas. En el nivel más bajo está el código de tiempo real, el cual trabaja esclavo a un reloj de tick de 1 ms derivado del GPS y distribuido a lo largo del Arreglo entero. De esta forma podemos correr tareas sincronizadas por medio de varios CPUs distribuidos a lo largo de las instalaciones. En la segunda etapa, cada proceso de tiempo real está controlado por un programa servidor que corre en el ambiente Linux. Este servidor provee de una interface de línea de comando que da un control completo del sistema en cuestión, así como muchas rutinas de prueba ingenieriles y funciones. Cada servidor puede ser accesado por vía remota con una simple interface base-texto para ingeniería remota y operaciones de prueba. En el nivel más alto, programas GUI más amigables para el usuario basados en el sistema de ventanas GTK puede conectar via un socket TCP/IP a cualquier servidor y dar toda la funcionalidad requerida normalmente para observar. La secuencia es dada por un único programa, llamado el "Central Scrutinizer", que conecta a todos los servidores y controla la adquisición de estrellas, colección de datos, y escribe un registro de todas las actividades. Adquirir un nuevo objetivo consiste en ingresar un número HD, SAO o IRC y dar click a un único botón. El Central Scrutinizer también recoge automáticamente solución a líneas base y datos para apuntar el telescopio en una dirección.

Por el modelo de cliente/servidor usado, el Arreglo CAARA (CHARA) puede ser controlado desde un solo CPU remoto vía una conexión segura a internet, y esta accesibilidad ha sido utilizada para establecer el Cleon C. Arrington Remote Operations Center (AROC), localizado en Atlanta en el Georgia State campus Fallon, McAlister, & ten Brummelaar

(2003). Una segunda instalación de control remoto ha sido establecida en los terrenos del Paris Observatory y fue usada para controlar el Arreglo por primera vez en Junio de 2004. Una capacidad remota para el combinador de haz UROUF (FLUOR) fue añadida a finales del 2004 Mérand et al. (2004).

Una herramienta de planeación de la observación basada en IDL para el CAARA (CHARA) ha sido desarrollada Aufdenberg (2004) y provee de un conjunto de herramientas completo para planear las observaciones con el Arreglo CAARA (CHARA): dando gráficas de cubrimiento UV; tiempos cuando el objeto particular está disponible para observación; gráficas teóricas de visibilidad; y ayudas en la selección de configuraciones del telescopio y PoP. Esta herramienta de planeación puede obtenerse del World Wide Web.

6. PROCESAMIENTO DE DATOS

Mientras todos esperamos que nuestras opiniones y métodos en análisis de datos evolucionen con el tiempo, discutimos aquí los dos métodos en uso actualmente en el Arreglo CAARA (CHARA). Ambos están basados en el trabajo de Benson et al. (1995) y produce resultados consistentes con cualquier otro, aunque el segundo método es más confiable en datos con bajo cociente de señal a ruido (S/R).

Escribimos la señal de franjas en cada pixel del detector como:

$$D_i(t) = \frac{I_{i1} + I_{i2}}{2} + (-1)^i \sqrt{I_{i1}I_{i2}} \nu \text{sinc}(\pi \Delta \sigma v_g t) \cos(2\pi \sigma_0 v_g t + \phi) \quad (1)$$

donde I_{ij} es la intensidad de la luz que llega al detector i del telescopio j , $\nu = VxV_{sis}$ es la correlación de los dos haces relacionados con la visibilidad del objeto V y la visibilidad del sistema V_{sis} , los filtros ópticos están centrados a un número de onda σ_0 y tiene un pasabanda de $\Delta\sigma$, v_g es la velocidad de grupo del paquete de franjas resultante del movimientos del espejo oscilador, y ϕ es la suma de la fase de las franjas y el error en la fase inducido por la atmósfera.

Esto debe calibrarse por la intensidad del haz de tal manera que esta expresión esté normalizada usando una versión de si misma después de pasarla por un filtro pasa-bajas que

resulta en:

$$N_i(t) = 1 + (-1)^i \frac{2\sqrt{I_{i1}I_{i2}}}{I_{i1} + I_{i2}} \nu \text{sinc}(\pi \Delta \sigma v_g t) \cos(2\pi \sigma_0 v_g t + \phi) \quad (2)$$

donde en vez de las intensidades tenemos ahora la señal normalizada $N_i(t)$ y vemos que eso será una función de transferencia debida a las intensidades de la luz de cada canal del detector dada por:

$$T_i = \frac{2\sqrt{I_{i1}I_{i2}}}{I_{i1} + I_{i2}}. \quad (3)$$

En el primer método de reducción de datos usado en el Arreglo CAARA (CHARA), ponemos la señal normalizada $N_i(t)$ a través de un filtro pasabanda centrado en la frecuencia esperada debido al movimiento del espejo oscilante. Un ejemplo de franjas procesadas, de la estrella Regulus (HD 87901) que rota rápidamente, observada el 16 de Abril de 2004 con la línea de base E1-S2, se muestra en la Figura 8. El panel superior muestra la franja original superpuesta con la versión suavizada de esa franja obtenida después del filtro pasa-bajas. La parte superior del panel de abajo (movida por 0.2 en la intensidad relativa para claridad) es esa franja normalizada a la versión suavizada, y la parte inferior del panel de abajo es el resultado del filtro pasabanda después del cual la máxima amplitud absoluta de la intensidad relativa a cero es una medida de ν . Esas franjas exhiben síntomas de dispersión longitudinal, la cual será corregida por el sistema SCDL (LDC) mencionado previamente. Para la mayoría de los casos de alto cociente de señal a ruido este método funciona bien, aunque tiene una tendencia a sobre estimar la correlación para datos de bajo cociente S/R.

Un segundo método de análisis está basado en un análisis espectral. Si calculamos el espectro de potencias de la señal de la franja, obtenemos:

$$PS[N_i(t) - 1] = T_i^2 \left(\frac{\nu}{\Delta \sigma v_g} \right)^2 \left[\Pi \left(\frac{\nu - \sigma_0 v_g}{\Delta \sigma v_g} \right) + \Pi \left(\frac{\nu + \sigma_0 v_g}{\Delta \sigma v_g} \right) \right] \quad (4)$$

donde:

y como la señal de la franja es una señal real, podemos ignorar con seguridad las frecuencias espaciales negativas y escribir:

$$PS[N_i(t) - 1] = T_i^2 \left(\frac{\nu}{\Delta\sigma v_g} \right)^2 \Pi \left(\frac{\nu - \sigma_0 v_g}{\Delta\sigma v_g} \right) \quad (6)$$

La integral total de la potencia entonces es:

$$S_i = \int d\nu PS[N_i(t) - 1] = T_i^2 \frac{\nu^2}{\Delta\sigma v_g} \quad (7)$$

y esto resulta en una estimación de ν^2 .

Como habrá también ruido del detector, de centelleo, y de fotones en la señal, todo esto debe ser eliminado antes de que la integración final sea hecha. Cada conjunto de datos está seguido por unas series de escaneo de datos incorporando obturadores que proveen datos de cada telescopio separadamente y sin luz de cualquier otro telescopio. El espectro de potencias con ambos obturadores cerrados contiene solamente ruido del detector, mientras que aquel con luz de los telescopios contiene ruido del detector y mitad del ruido por centelleo y de fotones. Esto contiene suficiente información para quitar el ruido del bias y estimar la función de transferencia T_i . Un ejemplo de espectro de potencias de una señal de franja tomado de la estrella HD 138852 el 6 de Junio de 2004 está dado en la Figura 9.

Hay una corrección más que puede hacerse a la correlación estimada. Debido a la turbulencia atmosférica, la correlación está cambiando constantemente y entonces puede ser considerada como una variable aleatoria con algún promedio $\bar{\nu}$ y una varianza σ_ν^2 . Como nosotros estamos midiendo el promedio del cuadrado de la correlación, estamos midiendo:

$$\bar{\nu^2} = \bar{\nu}^2 + \sigma_\nu^2 \quad (8)$$

y de esta manera todas las estimaciones del cuadrado de la correlación estan sezdadas (biased) por la varianza de la correlación. Desafortunadamente, no es posible tomar la raíz cuadrada de $S - i$ pues, debido a la naturaleza estadística de la medida, en ocasiones es negativa. Es, sin embargo, posible elevar al cuadrado S_i , resultando en una estimación de $\bar{\nu^4}$. Si uno supone que la distribución estadística de la correlación es normal, uno puede entonces formar el estimador sin sezdgo de la correlación:

$$\bar{\nu} = \left(\frac{3\bar{\nu}^2 - \bar{\nu}^4}{2} \right)^{1/4} \quad (9)$$

con la correspondiente varianza estimada:

$$\sigma_{\nu}^2 = \sqrt{\bar{\nu}^4 - \frac{1}{2}(\bar{\nu}^2 - \bar{\nu}^4)} - \bar{\nu}^2 \quad (10)$$

Dao que la correlación real nunca puede ser negativa, a veces es mejor usar una distribución lognormal, normalmente parametrizada usando las variables μ y σ^2 . Esto puede ser determinado usando:

$$\mu = \frac{1}{4} \ln \frac{\bar{\nu}^4}{\bar{\nu}^2} \quad (11)$$

y:

$$\sigma^2 = \frac{1}{4} \ln \frac{\bar{\nu}^4}{\bar{\nu}^2} \quad (12)$$

para el cual tenemos la correlación no sezgada estimada:

$$\bar{\nu} = \exp \left(\mu + \frac{1}{2} \sigma^2 \right) \quad (13)$$

con la varianza:

$$\sigma_{\nu}^2 = \exp(2\mu + 2\sigma^2) - \exp(2\mu + \sigma^2) \quad (14)$$

En la práctica, las ecuaciones normal y lognormal dan virtualmente los mismos resultados durante tiempos de buen tiempo de observación ó buena resolución angular, ó buena correlación, y típicamente fallan a muy bajo cociente de señal a ruido (S/R). Un ejemplo de algunos datos de correlación primarios se da en la Figura 10. En esta figura se muestran los histogramas de correlación original medida durante dos secuencias separadas de medición para el mismo objeto, uno tomado durante un tiempo en el cual la resolución angular era

proximadamente $1''$ y otro cuando la resolución era aproximadamente $2''$. Superpuestos a estas gráficas están los mejores ajustes a una curva Gaussiana. En el caso de buena resolución el histograma es muy simétrico y bien aproximado a una distribución normal, mientras que el histograma hecho durante una baja resolución angular es muy asimétrico y se requiere una distribución lognormal.

El efecto del sesgo (bias) de correlación discutido arriba se aprecia muy claramente en esos datos. En la reducción de los datos tomados durante buena resolución angular la correlación estimada basada directamente en la ecuación (7) es 0.543 ± 0.110 , donde el error dado es la desviación estándar formal de la medición, mientras que aquel basado en las estimaciones sin sesgo de las ecuaciones (9) y (13) son 0.542 ± 0.185 y 0.543 ± 0.100 , respectivamente. Las tres mediciones coinciden. Por otro lado, estos estimadores producen 0.180 ± 0.091 , 0.145 ± 0.165 , y 0.172 ± 0.084 en el ejemplo de mal tiempo de observación (pobre resolución angular), una diferencia de 8%. Claramente, esta medición del sesgo (bias) es muy importante a menos que las condiciones y funcionamiento del instrumento sean ambos muy buenos.

Este sesgo debido a la varianza de la correlación no es importante en los combinadores de haz de base de fibra tales como el UROUF (FLUOR) debido al filtrado espacial de los haces, y será también mucho menos importante en interferómetros de apertura más pequeña. Aún en el caso de las grandes aperturas del CAARA (CHARA) ciertamente afecta el resultado calibrado final, y nuestra investigación de este proceso de correlación del sesgo continúa.

Un conjunto de datos típico para una estrella objetivo es una secuencia de registros en la cual la estrella objetivo está intercalada entre registros de una estrella de referencia o de calibración que ha sido seleccionada en base a tener una visibilidad bien conocida o una visibilidad esperada cerca de la unidad. Variaciones en el tiempo en la visibilidad instrumental debidas a la resolución angular y otros efectos son compensados por interpolación de las épocas de la estrella objetivo a las épocas del calibrador y luego dividiendo las correlaciones medidas por las visibilidades del calibrador interpoladas corregidas por la visibilidad del calibrador esperada. El conjunto de programas de computadora también ha sido escrito para permitirnos usar la salida de este análisis y ponerlo en la forma correcta para uso con el paquete de programas de computadora de calibración y reducción de los datos producidos por el Centro Científico Michelson (Michelson Science Center) Boden et al. (1998).

La Figura 11 muestra dos conjuntos de medición completos tomados de las mismas dos noches que se muestran en la Figura 10. El ángulo de proyección en el objeto fue diferente en esas dos noches, así que uno espera un cambio en la función de visibilidad del objeto; ciertamente la función de visibilidad del objeto fue más alta durante la noche de pobre resolución angular que durante la noche de buena resolución. Aún así la correlación primaria del calibrador cambia significativamente en pobre resolución y se mantiene justamente estable en buena resolución angular. La línea baja en interferometría es la calibración de los datos, y el mayor impacto en esto es la resolución angular final (en inglés seeing). A pesar de nuestros esfuerzos para disminuir nuestros sesgos nuestros estimadores de correlación, los errores formales encontrados en el proceso de medición son siempre más pequeños que aquellos creados por el proceso de calibración. Nuestros mejores esfuerzos durante la temporada de observación de 2004 resultaron en buenas calibraciones al 4% cuando se usó el combinador de haz a aire abierto sin filtrado espacial. Esto se redujo a menos del 1% cuando se usa el combinador formado por fibras y filtrado espacial.

Al momento en que esto se escribe, más de 5000 conjuntos de datos han sido recogidos de 12 pares de líneas de base desde fines de 1999. La mayoría de las primeras observaciones han sido para propósitos de ingeniería, y únicamente ha sido desde la primavera de 2002 que la observación ha sido dirigida hacia la ciencia más que a la ingeniería. El primer año completo de observación dirigida principalmente hacia observaciones científicas fue 2004. En ese año abrimos las cúpulas de los telescopios un total de 229 noches, y de esas noches obtuvimos datos útiles en 154 noches. Mientras que la resolución angular final (seeing) claramente afecta nuestra habilidad para calibrar los datos, hemos encontrado que todavía es posible obtener datos aún para longitudes de correlación r_0 que caigan a 3 cm. Abajo de esto todavía es posible obtener franjas, aunque es imposible lograr alguna calibración que valga la pena. No se han encontrado ninguna correlación entre excelente calidad de datos y hora de observación, aunque si hemos encontrado cuatro distintas temporadas de observación aquí en Mount Wilson. Durante el invierno, la resolución angular final (seeing) es pobre y cerramos frecuentemente debido a los fuertes vientos, lluvia o nieve. Las condiciones mejoran durante la primavera, y nuestra mejor estación ocurre durante los meses de verano donde a menudo tenemos muchas noches claras de excelente resolución angular final (seeing), una tras otra. La estación de otoño es similar a la primavera, aunque a veces afectada por fuertes vientos.

7. CONCLUSIONES

El programa científico de tiempo completo del Arreglo CAARA (CHARA) ha estado de esta forma por solo un año, y esperamos muchos años emocionantes de ciencia, avances técnicos, y exploración del análisis de datos que vengan. El Arreglo CAARA (CHARA) fue construido dentro del presupuesto original y en un tiempo razonable por un pequeño grupo de científicos. Se han aprendido muchas lecciones a lo largo del camino desde los primeros días del CAARA (CHARA) que deben ser valubles para futuros proyectos, así que planeamos describir esa experiencia en otro momento.

Los seis telescopios, postes de luz, líneas de compensación, reductores del haz, correctores de dispersión longitudinal, y sistemas de muestreo del haz están instalados y completamente operacionales, y el Arreglo está programado ahora para una variedad de proyectos astronómicos. Mientras que observación científica de rutina se lleva de esta forma, nosotros buscamos mejoras técnicas y de funcionamiento incluyendo las capacidades de los telescopios en fase y combinación en muchas formas del haz que se espera comience en 2005.

Agradecimientos

El fondo de construcción para el Arreglo CAARA (CHARA) proporcionado por la National Science Foundation a través de la subvención 94-1449, la W. M. Keck Foundation, la David and Lucile Packard Foundation, y la Georgia State University. También agradecemos a la National Science Foundation por su fomento al proyecto a través de las becas separadas Fase A y Fase B. La construcción de nuestro hall de exhibición fue posible por un obsequio de Mr. Jack R. Kelly de la Georgia State University. El AROC fue nombrado después del anterior Vice Presidente de Investigación de la Georgia State, Cleon C. Arrington, en reconocimiento a su apoyo al CAARA (CHARA) durante años. Deseamos agradecer a Robert Jastrow, anterior director del Mount Wilson Institute, por su hospitalidad y cooperación. De igual forma agradecemos la cooperación de Terry Ellis, el anterior Alcalde de Distrito de Los Angeles River Ranger District del Angeles National Forest, que está trabajando con el CAARA (CHARA) para mejorar este proyecto en las tierras del National Forest. También agradecemos a E. J. Simison del Sea West Enterprises por su entusiasmo e iniciativa en el diseño y construcción de las instalaciones del Arreglo, así como a Gale Grant por su trabajo

en la automatización de las cúpulas.

REFERENCES

- Aufdenberg, J. P. 2004, CHARA Tech. Rep. 90, <http://www.chara.gsu.edu/CHARA/Reports/TR90.pdf>
- Bagnuolo, W. G., Jr. 1996, CHARA Tech. Rep. 37, <http://www.chara.gsu.edu/CHARA/Reports/tr37.pdf>
- Barr, L., Gerzoff, A., & Ridgway, S. T. 1995, CHARA Tech. Rep. 9, <http://www.chara.gsu.edu/CHARA/Reports/tr9.pdf>
- Barry, D. J., Bagnuolo, W. G., Jr. & Gies, D. R. 1994, BAAS, 27, 760
- Benson, J. A., Dyck, H. M., & Howell, R. R. 1995, Appl. Opt., 34, 51
- Berger, D. H. 2004, PASP, 116, 390
- Berger, D. H., ten Brummelaar, T. A., Bagnuolo, W. G., Jr., & McAlister, H. A. 2003, Proc. SPIE, 4838, 974
- Boden, A. F., Colavita, M. M., van Belle, G. T., & Shao, M. 1998, Proc. SPIE, 3350, 872
- Buscher, D. F. 1993, BAAS, 25, 1306
- Buscher, D. F. 1994, Proc. SPIE, 2200, 260
- Colavita, M. M., Wizinowich, P L., & Akeson, R. L. 2004, Proc. SPIE, 5491, 454
- Coudé du Foresto, V., Perrin, G., Mariotti, J., Lacasse, M., & Traub, W. 1997, in Integrated Optics for Astronomical Interferometry, ed. P. Kern & F. Malbet (Grenoble: Bastianelli-Guirimand), 115
- Coudé du Foresto, V., et al. 2003, Proc. SPIE, 4838, 280
- Fallon, T., McAlister, H. A., & ten Brummelaar, T. A. 2003, Proc. SPIE, 4838, 1193
- Hale, D. D. S., et al. 2000, ApJ, 537, 998

- Hillwig, T. C., Bagnuolo, W. G., Jr., & Riddle, R. L. 2002, *BAAS*, 34, 1130
- Hines, B. E., & ten Brummelaar, T. A. 2002, *Proc. SPIE*, 4848, 187
- McAlister, H. A., et al. 2004, *Proc. SPIE*, 5491, 472
- McAlister et al. 2005, *ApJ*, 628, 439 (Paper 1)
- Mérand, A., Birlan, M., Lelu de Brach, R., & Coudé du Foresto, V. 2004, *Proc. SPIE*, 5491, 1661
- Millan-Gabet, R., Schloerb, F. P., Traub, W. A., & Carleton, N. P. 1999, *PASP*, 11, 238
- Monnier, J. D., Berger, J. P., Millan-Gabet, R., & ten Brummelaar, T. A. 2004, *Proc. SPIE*, 5491, 1370
- Ogden, C. E., ten Brummelaar, T. A., & Sturmman, J. 2003, *Proc. SPIE*, 4838, 964
- Pedretti, E., et al. 2004, *PASP*, 116, 377
- Perrin, G., Coudé du Foresto, V., Ridgway, S. T., Mennesson, B., Ruilier, C., Mariotti, J.-M., Traub, W. A., & Lacasse, M. G. 1999, *A&A*, 345, 221
- Ridgway, S. T., ten Brummelaar, T. A., & Bagnuolo, W. G., Jr. 1994, CHARA Tech. Rep. 4., <http://www.chara.gsu.edu/CHARA/Reports/TR4.pdf>
- Ridgway, S. T. & Bagnuolo, W. G., Jr. 1996, CHARA Tech. Rep. 28., <http://www.chara.gsu.edu/CHARA/Reports/TR28.pdf>
- Ridgway, S. T., et al. 2000. *Proc. SPIE*, 4006, 696
- Ridgway, S. T., & McAlister, H. A. 2003, in *Small Telescopes in the New Millennium. II. Telescopes We Use*, ed. T. Oswalt (Dordrecht: Kluwer), 231
- Shao, M., Colavita, M. M., Hines, B. E., Staelin, D. H., & Hunter, D. J. 1988, *A&A*, 193, 357
- Sturmman, J., ten Brummelaar, T. A., Ridgway, S. t., Shure, M. A., Safizadeh, N., Strumann, L., Turner, N. N. H., & McAlister, H. A. 2003a, *Proc. SPIE*, 4838, 1208

- Sturmann, L. 1998, CHARA Tech. Rep. 66 <http://www.chara.gsu.edu/CHARA/Reports/TR66.pdf>
- Sturmann, L., Ridgway, S. T., Sturmann, J., ten Brummelaar, T. A., Turner, N. H., & McAlister, H. A. 2003b, Proc. SPIE, 4838, 1201
- ten Brummelaar, T. A. 1996a, Chara Tech. Rep. 39, <http://www.chara.gsu.edu/CHARA/Reports/TR39.pdf>
- ten Brummelaar, T. A. 1996b, CHARA Tech. Rep. 48, <http://www.chara.gsu.edu/CHARA/Reports/TR48.pdf>
- ten Brummelaar, T. A., & Bagnuolo, W. G., Jr. 1994, Proc. SPIE, 2200, 140
- ten Brummelaar, T. A., Bagnuolo, W. G., Jr., McAlister, H. A., Ridgway, S. T., Sturmann, L., Sturmann, J., & Turner, N. H. 2000, Proc. SPIE, 4006, 564
- ten Brummelaar, T. A., Bagnuolo, W. G., Jr., McAlister, H.A., Ridgway, S. T., Sturmann, L., Sturmann, J., & Shure, M. A. 2003, Proc. SPIE, 4838, 69
- ten Brummelaar, T. A., & Tango, W. J. 1994, Exp. Astron., 4, 297
- Thompson, L. A., & Teare, S. W. 2002, PASP, 114, 1029
- Traub, W. A. 1988, in NOAO-ESO Conference on High-Resolution Imaging by Interferometry: Ground-based Interferometry at Visible and Infrared Wavelengths, ed. F. Merkle (ESO Conf. Proc. 29; Garching: ESO), 1029
- Turner, N. H., & Eckmeder, K. 1997, CHARA Tech. Rep. 42, <http://www.chara.gsu.edu/CHARA/Reports/TR42.pdf>

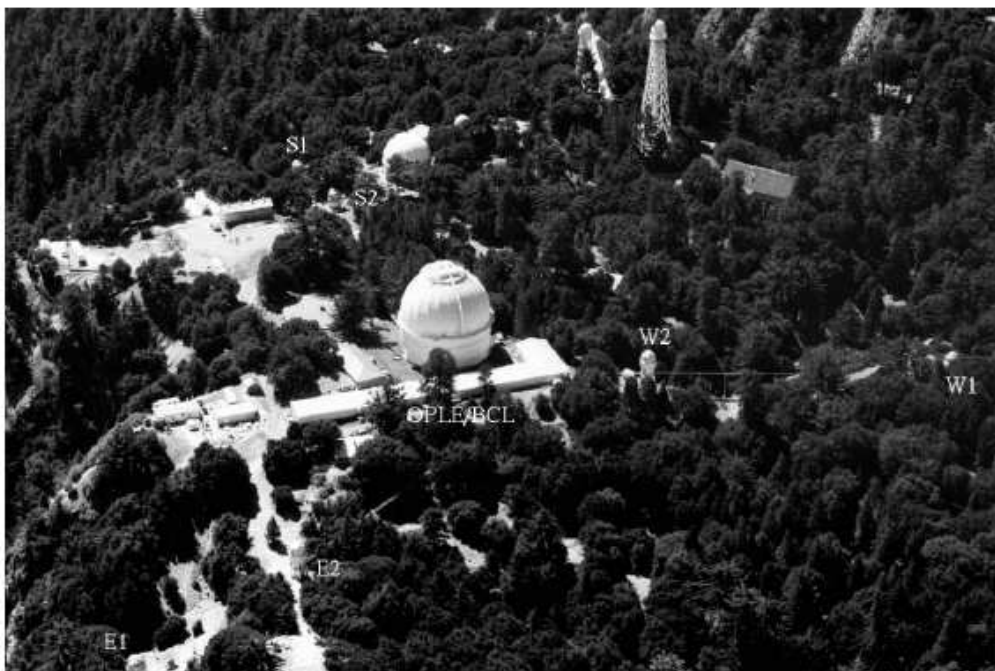
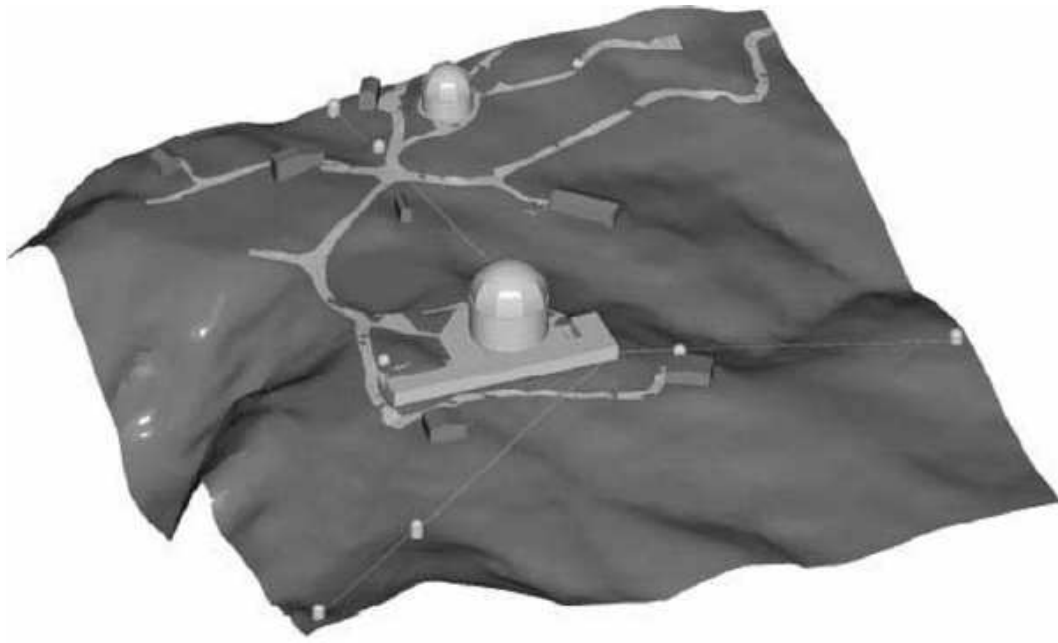


Fig. 1.— *Arriba:* Esquema del modelo de computadora de la montaña mostrando el Arreglo CAARA (CHARA). Esta es una vista desde el norte viendo al sur. La cúpula del telescopio de 2.5m está en el centro con la línea de retraso en forma de L y el edificio de la instalación para combinar el haz directamente detrás de él. *Abajo:* Fotografía del sitio tomada desde norte hacia el sur. La cúpula del telescopio de 2.5m se vé claramente detrás del edificio del /LCH.

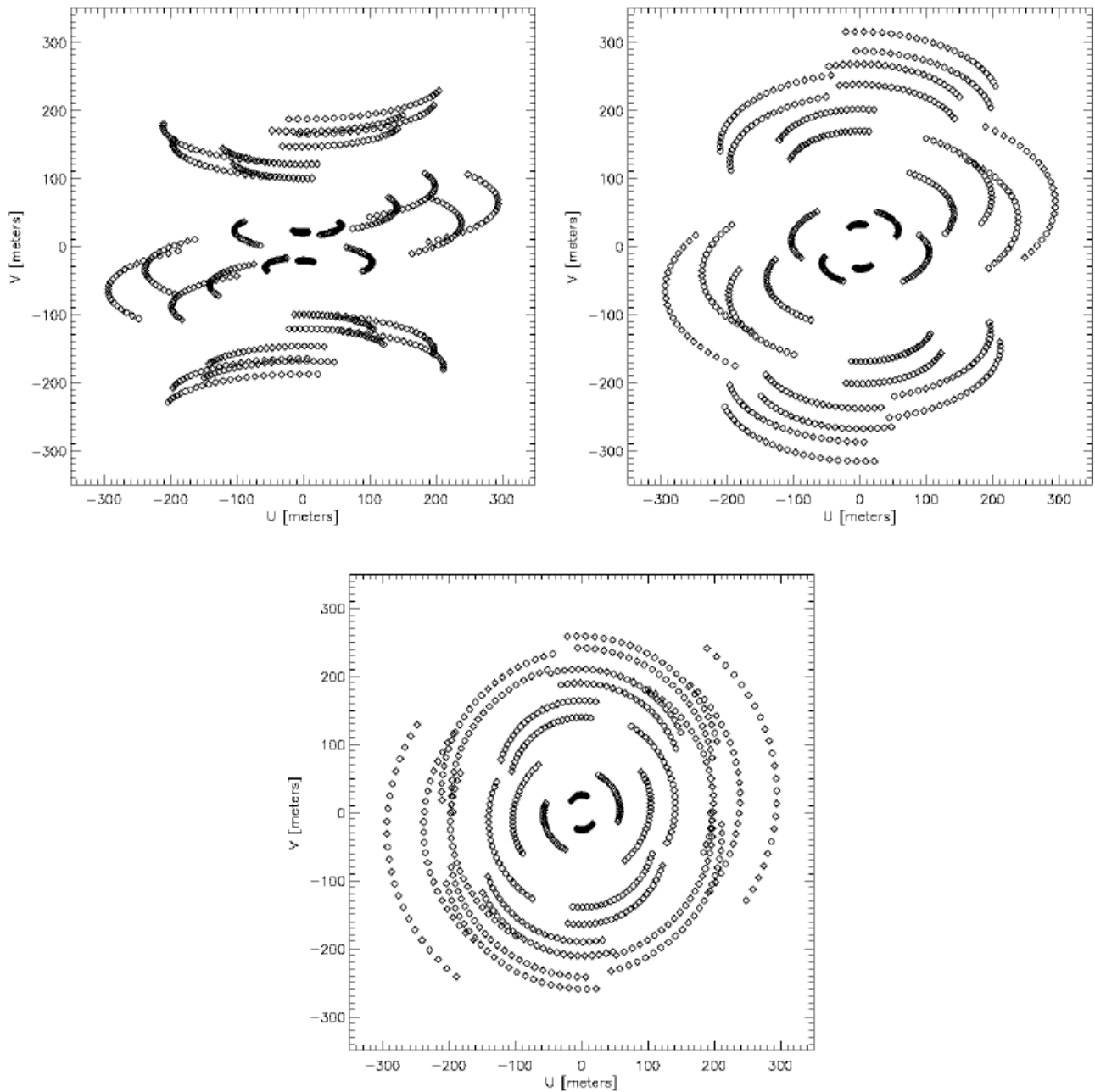


Fig. 2.— Cobertura UV del Arreglo CAARA (CHARA) para las declinaciones -15° (*arriba a la izquierda*), $+30^\circ$ (*arriba a la derecha*), y $+75^\circ$ (*abajo*). Cada gráfica muestra la cobertura resultante de los seis telescopios dentro de 3 hr en cualquiera de las direcciones de tránsito. Las unidades han sido dejadas en metros debido al amplio rango de posibles bandas de longitud de onda en uso en el CAARA (CHARA).

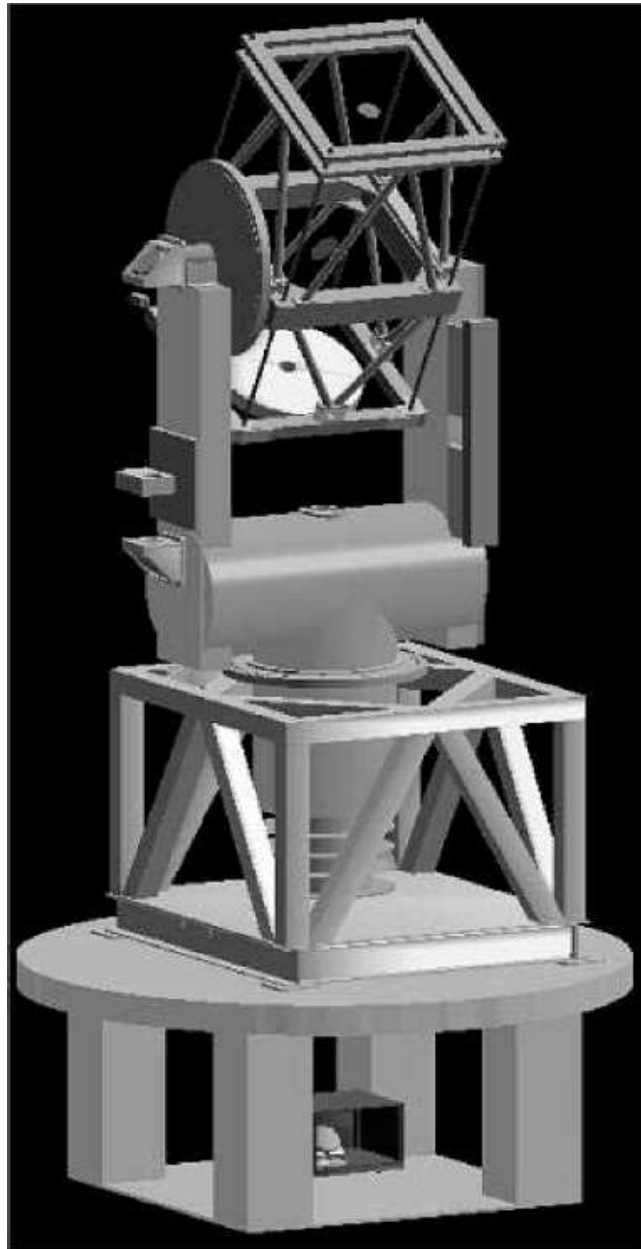


Fig. 3.— Dibujo DAC (diseño a través de la computadora, en inglés *computer aided design*, *CAD* de un telescopio CAARA (CHARA). El soporte azimutal está en la base de la horca, debajo de los cilindros de enrollado de cable. El dispositivo de fricción y los cilindros estáticos en la rueda de azimuth completan la definición del eje azimutal. Los baleros de elevación están arriba de los tubos de la horca, de igual forma que el engrane de elevación. El ensamble entero del telescopio descansa en una estructura de concreto cuyo peso varía de telescopio a telescopio para dar la localización correcta sobre el terreno local. Debajo del telescopio se encuentra la caja coudé que contiene al espejo 7.

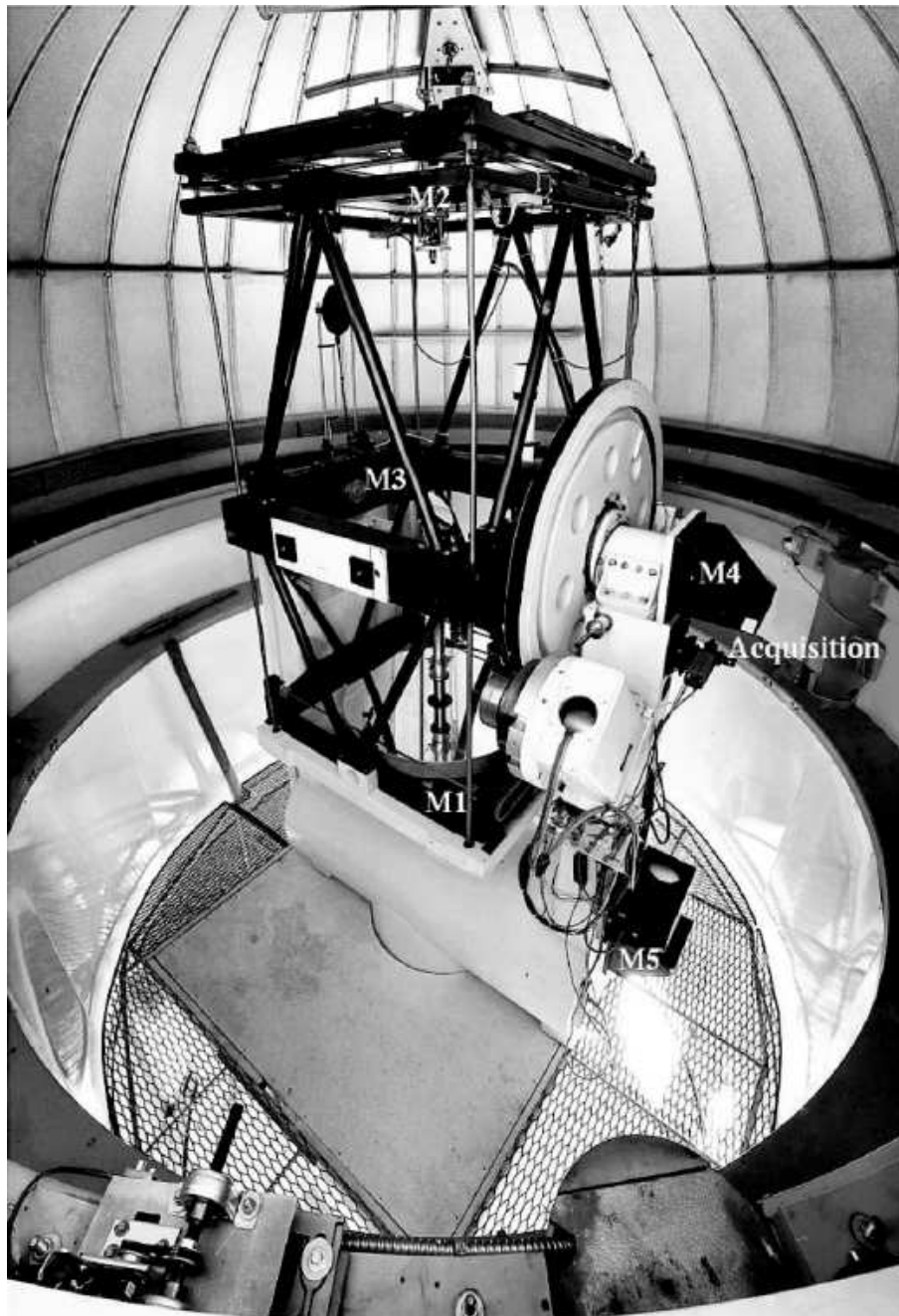


Fig. 4.— Fotografía de las componentes del telescopio W1. El sistema de manejo de la elevación está del lado derecho del telescopio. A la derecha de éste se encuentran las monturas M4 y M5 con la montura de la cámara de adquisición en medio. El espejo primario M1 se observa en la parte de abajo del telescopio y el secundario M2 en la parte superior, así como el pequeño hueco cúbico en el centro de M2. M3 se encuentra en el centro con M1 debajo de él. Fotografía de Steve Golden.

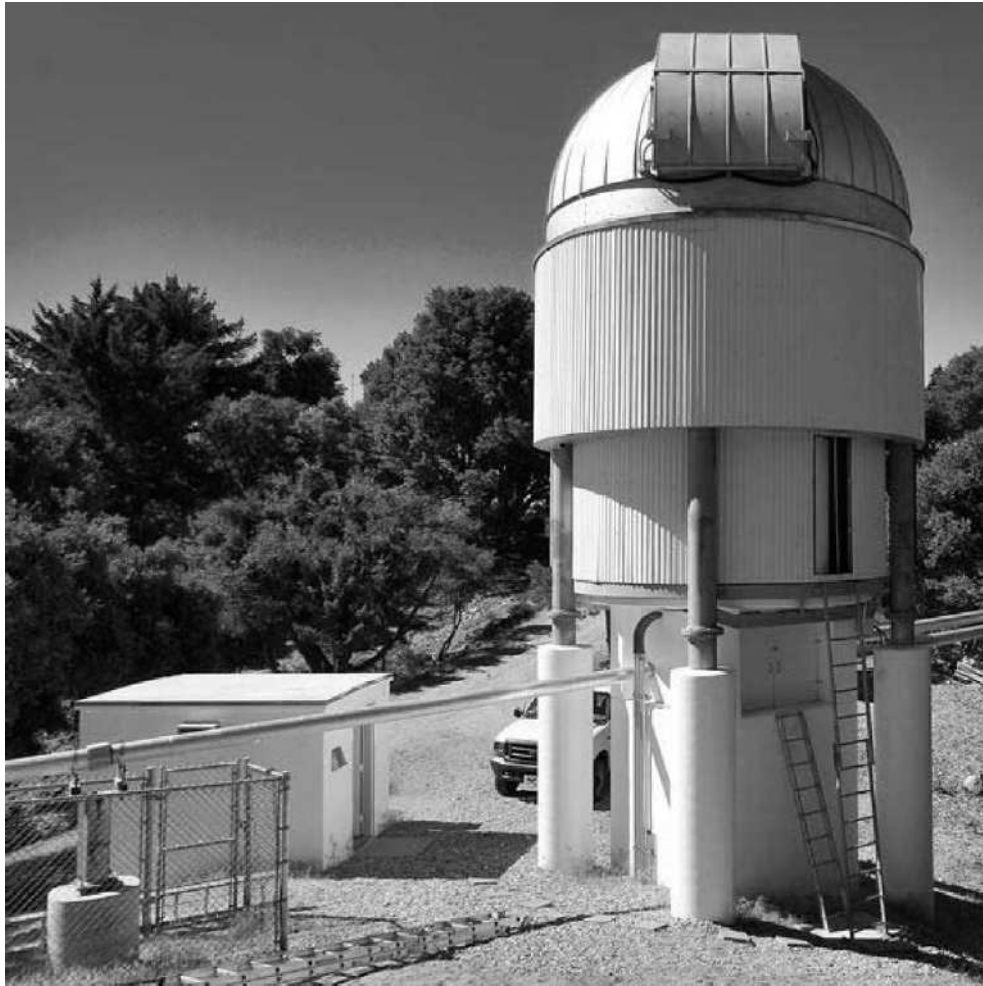


Fig. 5.— Estructura del telescopio E2 y cuarto de electrónica. La pequeña puerta de entrada puede verse a la derecha del cilindro más bajo del telescopio. Ambos cilindros, el más alto y el más bajo, pueden moverse para permitir un flujo libre de aire alrededor del telescopio. El tubo de luz del E1 viene de la izquierda, pasa a través del área coudé bajo el cilindro más bajo, y se va a la derecha con el tubo de luz del E2. Fotografía de Steve Golden.

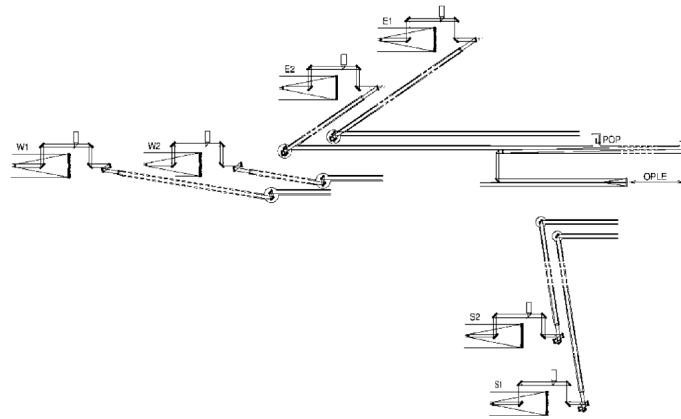


Fig. 6.— Esquema del tren óptico que trae la luz de cada telescopio dentro de la instalación para la síntesis del haz. Se ha mantenido la simetría óptica completa a pesar de la naturaleza tridimensional de la montaña.



Fig. 7.— Línea de compensación y área del manejo del haz. Los PoPs, periscopios, ELTOs, TRHs, SCDLs, y el sistema SMH son claramente visibles. Fotografía de Steve Golden.

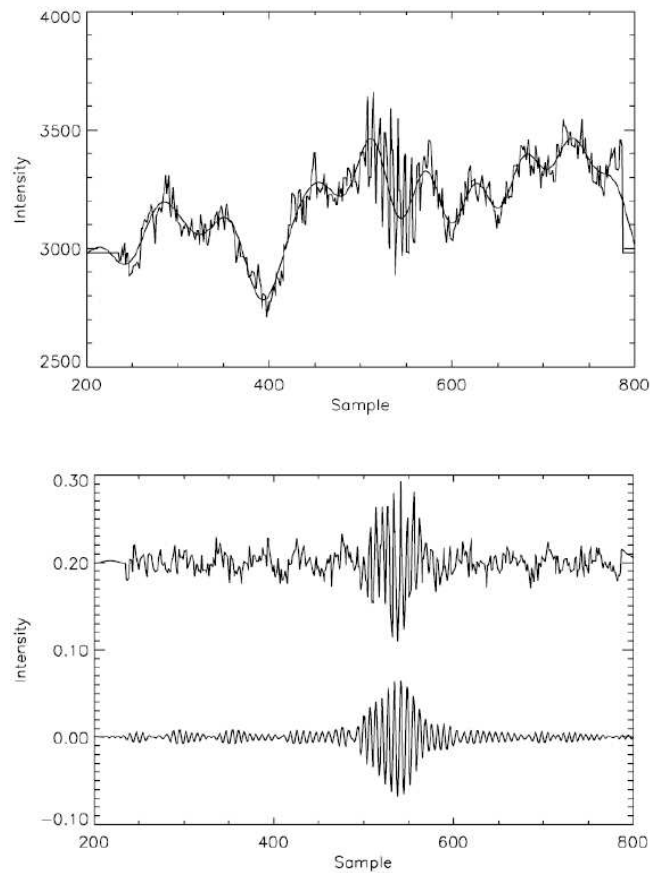


Fig. 8.— Vista del haz en su forma original (*arriba*) con la versión del filtro pasa bajos superpuesto previo a la normalización. El panel de abajo muestra la misma vista, contrarrestado por 0.2 de claridad, después de la normalización y, finalmente, después de la implementación del filtro pasabanda.

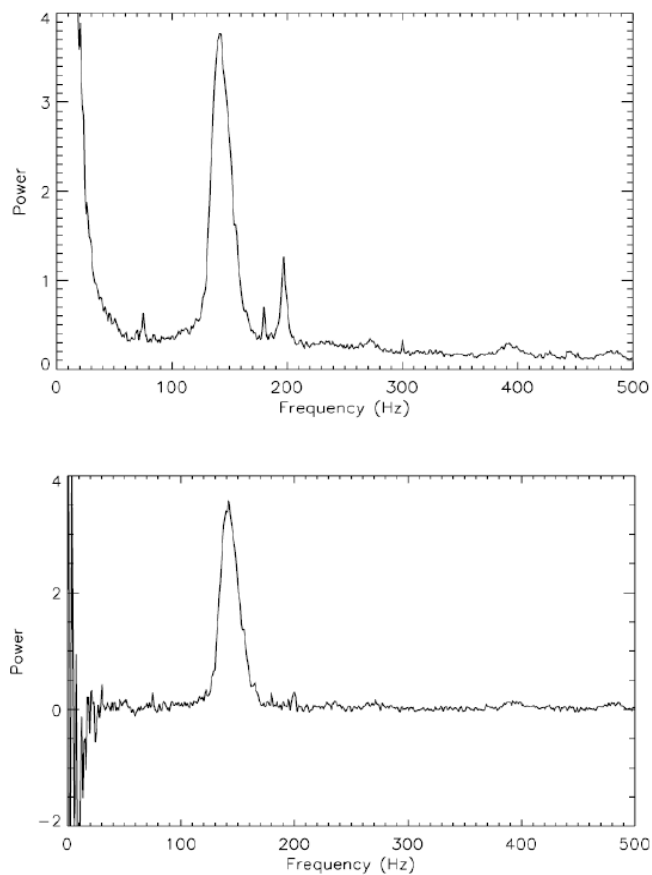


Fig. 9.— Ejemplo de un espectro de potencia sin procesar (*arriba*) mostrando una combinación de la señal de franja, ruido por fotones, ruido por scintillation, y ruido por la cámara. Una vez que el ruido ha sido medido y restado, únicamente la señal por la franja permanece (*abajo*).

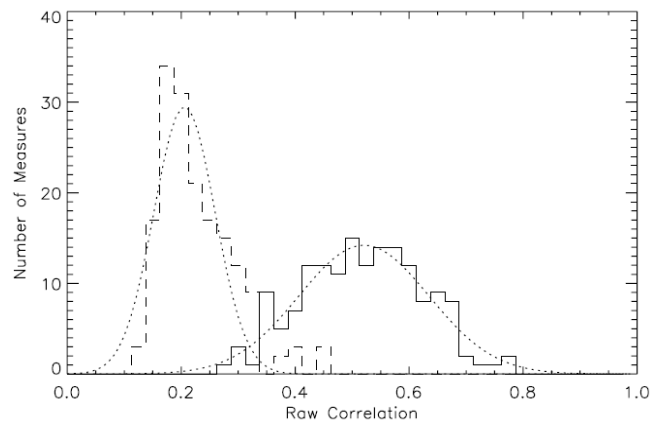


Fig. 10.— Dos histogramas de correlación sin procesar, de mediciones en el mismo objeto HD 197373 en dos diferentes noches, una de buena resolución angular el 20 de Junio de 2004 (*línea sólida*) y otra de resolución angular pobre el 29 de Junio de 2004 (*línea cortada*). Las líneas punteadas muestran la mejor aproximación a una curva Gaussiana para cada conjunto de datos.

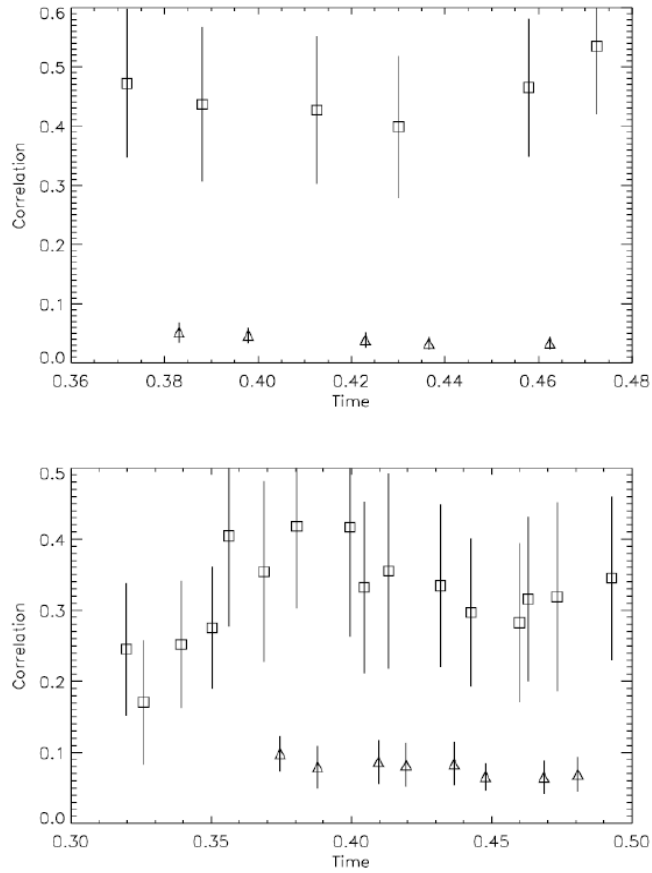


Fig. 11.— Dos ejemplos de una secuencia de medida completa, usando para calibrar a HD 197373 (*cuadros*) y el objeto HD 203280 (*triángulos*) en una noche de buena resolución angular (*arriba*) y una noche de resolución angular pobre (*abajo*). Estos datos son de las mismas dos noches que se muestran en la Fig. 10.