



INAOE

Construcción de un espectrómetro Acusto-Óptico

por

Guillermo Herrera Martínez

Tesis sometida como requisito parcial para
obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS EN LA
ESPECIALIDAD DE ASTROFÍSICA**

en el

**Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y
Electrónica**

Enero 2010

Tonantzintla, Puebla

Supervisada por:

Dr. Luis Carrasco Bazúa

Investigador Titular INAOE

Dr. Abraham Luna Castellanos

Investigador Asociado INAOE

©INAOE 2010

El autor otorga al INAOE el permiso de
reproducir y distribuir copias en su totalidad o en
partes de esta tesis



Resumen

La astronomía milimétrica y submilimétrica ha tomado relevancia en los últimos años en la investigación dentro del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). La construcción del Gran Telescopio Milimétrico (GTM), en colaboración con la Universidad de Massachusetts (UMASS), ha traído como consecuencia la investigación para el desarrollo de nuevas tecnologías de manufactura y desarrollo de nuevos instrumentos para la investigación en esta área de la astrofísica.

La instalación de un radiotelescopio con una antena de 5 m de diámetro (RT5), en el sitio de Sierra Negra, mismo donde se ha instalado GTM, nos da la oportunidad de diseñar, analizar e implementar instrumentación en esta banda del espectro electromagnético.

La espectroscopía en radiofrecuencias es una herramienta fundamental para el estudio de objetos astronómicos en la banda de las microondas, típicamente ubicada entre 30 y 300 GHz, tales como máseres y ráfagas solares. Para ello es necesario el diseño y construcción de instrumentos con alta resolución espectral de bajo consumo de potencia y con dimensiones lo más compactas posibles que faciliten su manejo, transporte y acoplamiento al telescopio.

Desde que Lambert [13] sugirió el uso del efecto acusto-óptico para el análisis espectral en radiofrecuencias, se han visto grandes progresos tanto teóricos como experimentales en el desarrollo de materiales acusto-ópticos, materiales piezo-eléctricos a altas frecuencias, módulos láser de bajo consumo de energía y lentes. La conjunción de estos avances han hecho más fácil la implementación de instrumentos de este tipo.

Los espectrómetros acusto-ópticos han mostrado claras ventajas tanto en consumo de energía como en fácil manejo y transporte, razones principales por las que se han implementado en telescopios espaciales tales como SWAS [11] y HERSCHEL [5], y la tecnología involucrada está en constante desarrollo.

Este trabajo presenta los primeros resultados de una versión de laboratorio como primer etapa para la construcción de un espectrómetro acusto-óptico. Se analizan las características individuales de las componentes ópticas y electrónicas así como los resultados en conjunto.

Agradecimientos

Al pueblo mexicano, el cual ha financiado toda mi educación desde el inicio, así como a todos los verdaderos amigos que he ido conociendo a lo largo de mi preparación profesional. Al Dr. Abraham Luna y al Dr. Luis Carrasco por todo el apoyo que me han brindado para la realización de este trabajo.

Al Dr. Shcherbakov, Daniel Sánchez, la gente del Taller de Óptica, del Taller mecánico, del laboratorio del Microondas, del laboratorio de caracterización de circuitos integrados y demás personal del INAOE, gracias por su apoyo para resolver las dudas y por la orientación para las realización de las pruebas.

A mis padres:

Carmen Martínez Lara

Bulmaro Herrera Cruz

Mis Hermanos:

César y Joaquín

A Adriana.

Índice general

Índice general	I
1. Introducción	1
1.1. Motivación científica	2
1.2. Estructura básica de un radiotelescopio	3
1.2.1. Heterodinaje	3
1.3. Instrumentos utilizados para espectroscopía en radiofrecuencias	5
1.3.1. Banco de filtros	5
1.3.2. Autocorreladores	5
1.3.3. Acusto-Ópticos	5
2. Procesamiento Acusto-Óptico de la señal	7
2.1. Introducción	7
2.2. Regímenes de operación de una celda acusto-óptica (CAO)	8
2.3. Resolución teórica del espectrómetro	10
2.3.1. Rango de difracción angular	10
2.3.2. Producto Tiempo-Ancho de banda	12
2.3.3. Resolución Espectral	14
2.3.4. Ancho de banda	14
3. Montaje del espectrómetro acusto-óptico	15
3.1. Introducción	15
3.2. Requerimientos y características principales del EAO	17
3.2.1. Resolución espectral y ancho de banda	17
3.3. Diagrama modular general	18
3.4. Celda Acusto-Óptica	19
3.4.1. Introducción	19
3.4.2. Especificaciones técnicas de la CAO	19
3.4.3. Ángulo del haz difractado	21
3.4.4. Controlador	22
3.5. Módulo láser	22
3.5.1. Introducción	22
3.5.2. Láser HRP-120	24

3.6.	Módulo de expansión y colimación	25
3.6.1.	Introducción	25
3.6.2.	Expansor de haz Thorlabs BE15M-A	26
3.7.	Módulo de enfoque	27
3.7.1.	Introducción	27
3.7.2.	Sistema Edmund TECHSPEC High Resolution Large Format Lenses 0.7x	27
3.7.3.	Especificaciones técnicas	27
3.8.	Cámara CCD de arreglo lineal	27
3.8.1.	Introducción	27
3.8.2.	Estructura básica de un CCD	28
3.8.3.	Cámara LC1-USB	28
3.8.4.	Especificaciones y características	29
3.8.5.	Software de adquisición de datos spectra.exe	29
3.9.	Manufactura de piezas mecánicas y ópticas	30
3.9.1.	Ajuste de altura del expansor BE15M-A y base de fijado del bloque óptico de la CAO	31
3.9.2.	Espejos	32
3.10.	Esquema de montaje modular	34
4.	Desarrollo de pruebas y análisis de resultados	35
4.1.	Introducción	35
4.2.	Pruebas al módulo láser	36
4.2.1.	Patrón de difracción	36
4.2.2.	Perfil del haz	37
4.2.3.	Estabilidad en potencia	38
4.3.	Evaluación y desempeño de la expansión y colimación del haz	39
4.4.	Pruebas y análisis de la señal inyectada a la CAO	40
4.5.	Medición de los ángulos del haz difractado	42
4.6.	Pruebas y mediciones del módulo de enfoque	45
4.6.1.	Montaje experimental para la medición de la lfp y el tamaño de mancha en el plano focal del sistema de lentes de enfoque	47
4.7.	Espectro sintético	49
5.	Conclusiones	53
A.	Esquemas de componentes mecánicas	55
	Índice de figuras	64
	Índice de Tablas	67
	Bibliografía	68

Prefacio

En este documento se muestran los resultados de las pruebas realizadas con las diferentes componentes con las que se cuenta, así como los primeros resultados de la primer etapa hacia la construcción de un espectrómetro acusto-óptico (EAO).

En los primeros dos capítulos se describe la motivación para la construcción de un instrumento de este tipo, la ubicación dentro de un esquema de radiotelescopio y se describe el fenómeno fundamental para su operación: el efecto acusto-óptico. Se presenta brevemente un repaso por la historia de la acusto-óptica, los diferentes regímenes de operación de una celda acusto-óptica (CAO), así como de la descripción del fenómeno físico en forma de interacción de partículas, además se justifica su aplicación a la espectroscopía en radio frecuencias. También se analizan las ventajas de un espectrómetro de este tipo respecto a los más comúnmente usados en radioastronomía (bancos de filtros y autocorreladores) y se establecen las expresiones matemáticas para evaluar el desempeño del instrumento: resolución espectral y ancho de banda.

En el capítulo 3, el instrumento se secciona por módulos, se describen y analizan las características y su función que desempeñan cada uno de estos dentro del instrumento. Además se muestran las componentes mecánicas que se han tenido que construir para el soporte de componentes ópticas y lograr así un mejor acomplamiento al plano óptico del instrumento.

En el capítulo 4 se muestran los resultados de las diferentes pruebas realizadas de forma individual a los módulos y se hace el montaje final para esta versión obteniendo resultados en conjunto. El capítulo 5 está destinado a las conclusiones.

El apéndice A se muestran los diagramas mecánicos de los componentes del espectrómetro, los esquemas de las componentes ópticas y el diagrama general con componentes reales ya montadas en la mesa óptica de la versión de laboratorio.

Capítulo 1

Introducción

El INAOE (Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica) tiene, curricular e históricamente, la capacidad de innovar e implementar instrumentación en las áreas de astrofísica, óptica y electrónica. Actualmente INAOE, en colaboración con UMASS (Universidad de Massachusetts), está construyendo el radio telescopio GTM (Gran Telescopio Milimétrico), este hecho ha incorporado a INAOE en la evaluación de tecnologías e instrumentos en muchos campos novedosos y en especial en el área de radio astronomía [8].

INAOE ha emprendido, desde los inicios de la construcción del GTM, la investigación de nuevas tecnologías para solucionar las necesidades y retos que el radiotelescopio y sus instrumentos han planteado. Como ejemplo de estas necesidades y consecuencias, se ha creado el laboratorio de superficies esféricas, y se rehabilita y moderniza un radio telescopio con un paraboloide de revolución de 5 metros de diámetro (RT5)[19] cerca de donde funcionará el GTM. El área de instrumentación en altas frecuencias, en radio, ha tenido su despegue y crecerá hasta formar el equipo tecnológico y humano necesario para el mantenimiento de los instrumentos que son la principal aportación de UMASS para con GTM. El reto actual de INAOE está en las etapas finales de construcción del radio telescopio GTM, el acoplamiento y puesta en funcionamiento con algunos instrumentos.

El telescopio de 2.1 m Guillermo Haro de Cananea, Sonora, y la cámara IR CANICA, entre otros, son ejemplos del trabajo interdisciplinario de investigadores de las tres áreas con mayor tradición en INAOE, astrofísica, óptica y electrónica. Con este antecedente, desde enero de 2006, un grupo de investigadores de INAOE se dio a la tarea de evaluar la factibilidad de un espectrómetro acusto-óptico diseñado (EAO) y construido en INAOE.

En este trabajo se presentan los primeros resultados del primer montaje experimental, así como todo el análisis de los módulos componentes que en esta primera etapa se adquirieron. Este análisis se concentra en la efectividad que presentan las componentes por separado y en conjunto, lo cual arroja los primeros resultados en forma de espectros sintéticos.

1.1. Motivación científica

La astronomía milimétrica y submilimétrica es la ventana electromagnética de más reciente exploración científica. Su cobertura va desde frecuencias de 50 GHz hasta unos pocos THz. En este rango de longitudes de onda, la atmósfera no es totalmente transparente y presenta atenuación atmosférica.

La atenuación atmosférica se debe principalmente a la composición molecular de la atmósfera terrestre, básicamente agua, oxígeno, nitrógeno y bióxido de carbono. Para evitar estas moléculas, y su consecuente atenuación en este intervalo espectral, los instrumentos astronómicos para este rango deben ponerse fuera de la atmósfera o en montañas altas y secas.

Emisión térmica, no térmica y emisión de líneas moleculares (rotacionales cuantizadas) son los principales efectos naturales que producen microondas en el universo. Objetos astronómicos relacionados con estos efectos son tópicos primordiales en la astronomía contemporáneas. El fondo cósmico de microondas (FCM) y el medio interestelar denso (MIE). El FCM es la emisión residual de la gran explosión inicial del universo, el big-bang, y el MIE molecular es el sitio en donde la formación estelar ocurre. Aunado a estos temas generales hay temas particulares relacionados íntimamente, tales como: las fluctuaciones del FCM, las nubes moleculares gigantes, los núcleos densos de emisión molecular en donde las estrellas están naciendo, regiones con emisión estimulada de radiación en microondas (MASER) en torno a estrellas, sistemas planetarios y atmósferas planetarias.

Observaciones espectrales y en el continuo de estos fenómenos, nos dan información relacionada a sus procesos físicos. La obtención de detalles de la distribución espacial en estos objetos requiere de grandes aperturas o de técnicas interferométricas. También, detalles en la cinemática y abundancias químicas justifican la necesidad de alta resolución espectral. Perfiles precisos de las líneas de emisión dan información sobre fenómenos con variabilidad debido a turbulencia, cinemática y mecanismos de bombeo energético. Fenómenos que ocurren en el MIE relacionados a regiones de formación y de las etapas tardías de la evolución de estrellas son temas de investigación actual.

La espectroscopía es una herramienta de investigación invaluable en muchos campos de la industria, ciencia y tecnología. El análisis espectroscópico se convierte en la única herramienta viable para la obtención de información en muchos fenómenos y procesos. El caso de la astronomía es uno de los que mejor ejemplifica el potencial de la espectroscopia, pues permite obtener información de objetos muy lejanos y en ambientes muy variados y extremos.

El uso del fenómeno acusto-óptico en espectrómetros con usos astronómicos es un tema consolidado en el ámbito internacional y con perspectivas de perfeccionamiento [23]. Además, el fenómeno en si tiene diferentes aplicaciones en ramas como las telecomunicaciones e informática.

El análisis de las especies moleculares y de las líneas emitidas, permiten mejorar los modelos de formación estelar ya que obtenemos información de las cantidades, cualidades y cinemática de la región de formación.

El efecto Doppler permite obtener la cinemática de las regiones usando las líneas emitidas. Nos permite abordar el tema de la cinemática y dinámica galáctica para el caso de una galaxia completa. El fenómeno de formación estelar es una de las claves para resolver los modelos de formación de las galaxias en el universo temprano. Esta condición temporal, en etapas primitivas del universo, implican la detección de las fases frías a altos corrimientos Doppler. Las líneas y bandas de detección que originalmente caen en el infrarrojo serán corridas hacia las bandas en sub-milímetros, haciendo de esta banda espectroscópica la mejor localizada para estos estudios.

1.2. Estructura básica de un radiotelescopio

Son muchas las variantes en cuanto a tipos de antenas y receptores que se usan en radioastronomía. La colección y detección de la señal son las primeras etapas de un radiotelescopio. En lo que a recepción se refiere existen 2 tipos: *coherente* e *incoherente*, de esta última el ejemplo más común son los bolómetros, los cuales son dispositivos que absorben la radiación, haciendo variar la temperatura del material que los compone, estos cambios nos dan la variación de la intensidad de la radiación captada. Estos dispositivos son de banda ancha por lo tanto para hacer mediciones específicas en cierta banda se necesitan una etapa de filtrado externa, en este tipo de receptores la fase de la señal es lo más importante.

Los receptores de RT5 son de tipo coherente debido a que aún no hay amplificadores de bajo ruido a frecuencias muy altas, el tratamiento de la señal se hace por medio de receptores heterodinos, esta técnica se describe de manera general en la sección 1.2.1. En la figura 1.1 podemos apreciar las diferentes etapas de un radiotelescopio, la primera etapa es el receptor de tipo heterodino en el que se reduce la frecuencia portadora de la señal recibida, a esta etapa se le conoce como *front-end*. Posteriormente se filtra y amplifica y puede volver a ser mezclada para obtener los anchos de banda y frecuencias centrales apropiadas para los procesos siguientes, en este punto la señal que es entregada a la siguiente etapa se le conoce como *frecuencia intermedia* (FI).

Los elementos involucrados en las siguientes etapas del procesamiento de la señal son la parte conocida como *back-end*, cuya señal de entrada es la FI y el resultado es el procesamiento final de la señal, para nuestro caso un espectro de potencias de la señal recibida. El espectrómetro acusto-óptico (EAO) se encuentra ubicado dentro de esta segunda etapa.

1.2.1. Heterodinaje

Con la técnica del heterodinaje podemos hacer observaciones a muy altas frecuencias, donde la amplificación de bajo ruido es prácticamente imposible. El proceso se basa en convertir la señal de alta frecuencia en otra de frecuencia mucho menor donde el procesamiento y amplificación se hace más fácil. Esto se logra mediante el uso de un oscilador monocromático estable, llamado oscilador local (*OL*); un mezclador, el cual

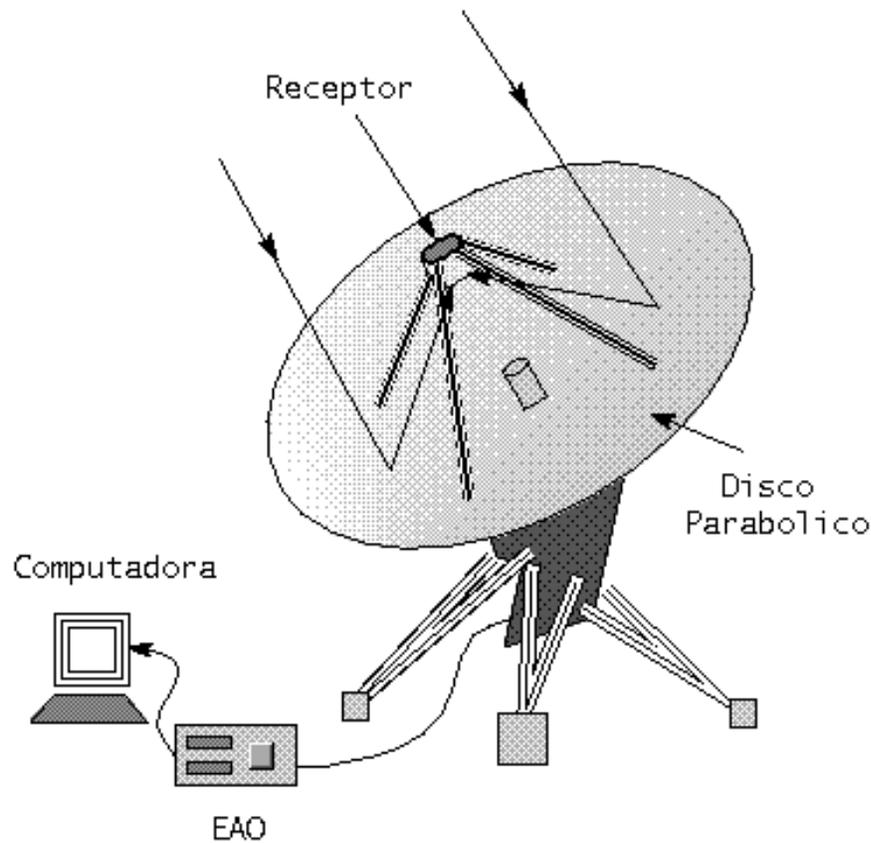


Figura 1.1: Estructura de un radiotelescopio

se encarga de multiplicar la radioseñal astronómica (S) con la señal del OL y una etapa de filtrado para las componentes de alta frecuencia. Esto da como resultado una señal con la misma información espectral pero a una frecuencia mucho menor. La señal resultante es la FI:

$$A_S \cos(\omega_S t) A_{OL} \cos(\omega_{OL} t) = \frac{A_S A_{OL}}{2} \{ \cos(\omega_S + \omega_{OL}) \cdot t + \cos(\omega_S - \omega_{OL}) \cdot t \}.$$

Como podemos apreciar en la expresión anterior, el resultado del producto de las señales es otra señal con 2 componentes, una de muy alta frecuencia ($\omega_S + \omega_{OL}$) y otra de baja frecuencia ($\omega_S - \omega_{OL}$), con la principal característica de que la información de la fase de la señal S se conserva. La componente de alta frecuencia se suprime mediante técnicas de filtrado, quedandonos solamente la componente de baja frecuencia. Otra ventaja que podemos apreciar es que la señal del OL amplifica las radioseñales débiles.

1.3. Instrumentos utilizados para espectroscopía en radiofrecuencias

Aquí se resumen las características básicas de los espectrómetros usados para longitudes de onda de radio milimétricas y sub-milimétricas.

1.3.1. Banco de filtros

Los bancos de filtros son, quizá, la forma más directa de obtener el espectro de potencias de una señal de radio. La señal colectada pasa a través de un ramificador de potencia seguido por una serie de filtros pasa-banda angosta (1 MHz o menor), cada uno de los cuales manda la potencia resultante a un detector de ley cuadrada, a un convertidor analógico/digital y luego a la computadora para despliegue. En la práctica los bancos de filtros son complicados, aún uno de tamaño moderado puede ocupar todo un gabinete de dimensiones considerables dentro del un cuarto. Como cada filtro (que pueden ser cientos) tiene diferente frecuencia central, cada uno se diseña en forma individual. La cantidad de partes es extremadamente grande, así que la posibilidad de que algo falle es alta, además de tener un consumo de potencia por canal muy elevado.

1.3.2. Autocorreladores

La señal puede ser digitalizada electrónicamente (“correlada”, típicamente con 1 o 2 bit). Esta señal digitalizada puede ser muestreada y registrada temporalmente resultando en lo que se llama la función de correlación. La transformada de Fourier de la función de autocorrelación es el espectro de potencias. Los autocorreladores son comúnmente usados para longitudes de onda en centímetros en arreglos interferométricos (como VLA), estos demandan un gran consumo de potencia. Actualmente se han adaptado para longitudes de onda más cortas, siendo este tipo de diseño las propuestas de UMASS para GTM.

1.3.3. Acusto-Ópticos

La aproximación al rango de altas frecuencias en el espectro electromagnético se ha hecho con tecnologías basadas principalmente en técnicas usuales en longitudes de onda de radio. Para el caso de las frecuencias mas altas la aproximación se puede dar con tecnologías basadas en métodos cuasi-ópticos. La tecnología a usar depende de las cualidades del fenómeno a estudiar y ambas técnicas han evolucionado paralelamente. El efecto acusto-óptico tiene una historia breve que se inicia en 1922 cuando Brillouin predice la difracción de la luz por una onda acústica al propagarse en un mismo medio [1]. Fue hasta 1937 que Raman y Nath [20] desarrollan un modelo ideal que es mejorado por Phariseau en 1956 [18]. Hasta este momento el efecto no tenía aplicaciones tecnológicas, fue con la invención del láser, el progreso en el crecimiento de

cristales y los materiales piezo-eléctricos a altas frecuencias, con lo que adquiere la importancia tecnológica actual.

El caso de la tecnología acusto-óptica aplicada para espectroscopia astronómica se inicia en la década de los 70's. En forma independiente por parte grupos australianos, japoneses y rusos [9] [22] [2].

Quizá los espectrómetros acusto-ópticos son el diseño más indirecto, pero son populares. La señal de FI es inyectada a un transductor piezo-eléctrico, el cual mecánicamente modula una celda de Bragg a través de la cual pasa un haz de luz láser. La luz láser es difractada en un ángulo que depende de la longitud de onda láser y de la longitud de onda acústica del modulador piezo-eléctrico. Esto hace que las diferentes frecuencia de la señal de radio presentes simultáneamente en la celda acusto-óptica resulten en varios haces difractados simultáneamente. Este patrón de difracción es medido por algún fotodetector y el registro de la intensidad de los haces es almacenado en una computadora.

Capítulo 2

Procesamiento Acusto-Óptico de la señal

2.1. Introducción

Las ondas acústicas han sido estudiadas ampliamente desde el siglo XIX, primeramente por Lord Rayleigh en 1885. El efecto acusto-óptico fue estudiado y predicho por el físico francés Léon Nicolas Brillouin en 1922 [1], el cual físicamente describe la interacción entre luz y ondas acústicas lo cual produce difracción de la luz debido a la perturbación del medio causada por una onda acústica.

Posteriormente, en 1932, Debye y Sears [3], por un lado, y Lucas y Biquard [14], verificaron experimentalmente que esto es posible si se tiene una fuente de luz suficientemente coherente. En sus experimentos observaron que la luz se difractaba en diferentes ordenes espaciados simétricamente respecto al orden 0. La presencia de los múltiples ordenes fue descrita por Raman y Nath entre 1935 y 1936 [20], quienes modelaron la columna de sonido como una rejilla de fase esto explicaba los diferentes ordenes de difracción debido a interferencia. Klein y Cook [10] hacen una descripción cuantitativa entre simple y múltiples ordenes de difracción, mostraron que mediante el parámetro adimensional Q , también conocido como el parámetro Klein-Cook y que es múltiplo de la razón Debye-Sears, se puede conocer el régimen de difracción.

Con la aparición del láser en la década de los 60, las aplicaciones prácticas de este efecto tomaron relevancia.

La interacción entre luz y sonido puede ser descrita en términos de interacción de ondas o colisión de partículas, como veremos en la siguiente sección.

2.2. Regímenes de operación de una celda acusto-óptica (CAO)

Físicamente la dispersión de la luz debida a ondas acústicas puede ser descrita en términos clásicos como la de una rejilla acústica dinámica. La propagación de la onda acústica a través de un medio foto-elástico es tratada como la variación del índice de refracción a través del medio por el cual se propaga la onda acústica [25].

El patrón de difracción depende esencialmente de la longitud de interacción entre la luz y la onda acústica, de modo que los regímenes de difracción comprenden básicamente dos casos límite, el correspondiente a una longitud pequeña y una grande. Si la longitud de interacción es muy pequeña, la rejilla es delgada y los máximos de intensidad están dados por

$$\sin\theta_p = \sin\theta_0 + \frac{p\lambda}{n\Lambda},$$

donde θ_p es la dirección donde se localiza el máximo p , con $p = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$, θ_0 es el ángulo de incidencia de la luz cuya longitud de onda es λ , n el índice de refracción del medio y Λ la longitud de onda de la onda acústica, conectada con $V = \Lambda f$ es decir la velocidad del sonido en el medio y f la frecuencia de la misma. En la figura 2.1(a), el patrón de difracción está compuesto de máximos situados simétricamente respecto del orden 0, conservándose las leyes de momento y energía. Tal régimen es identificado como el régimen de Raman-Nath con la condición:

$$Q = \frac{\lambda L}{\Lambda^2} \ll 1.$$

El otro caso límite ocurre cuando la longitud de interacción es grande, mostrado en la figura 2.1(b) esto ocurre cuando en una rejilla gruesa el ángulo de incidencia θ_0 cumple con la condición de Bragg,

$$\sin\theta_B = \frac{\lambda}{2n\Lambda},$$

y el parámetro Klein-Cook cumple con la desigualdad:

$$Q = \frac{\lambda L}{\Lambda^2} \gg 1,$$

normalmente el régimen de Bragg solo tiene un orden de difracción.

La intensidad de los diferentes órdenes de difracción se muestran en las figuras 2.2, donde $q = \pi(\lambda \cos\theta)^{-1} \sqrt{2M_2 P S^{-1}}$, M_2 es la figura de mérito acusto-óptica, el cual es el parámetro principal del medio acusto-óptico, entre más grande sea esta menor será la potencia de la onda acústica [28], y P/S es la densidad de potencia acústica. Como podemos apreciar el régimen de Bragg es el adecuado para este trabajo debido a que nos da la oportunidad de tener un 100% de eficiencia en la dispersión de la luz por los fonones de coherencia acústica [10].

En la figura 2.3, se plantea la geometría de la interacción particular en un medio anisotópico de un cristal uniaxial.

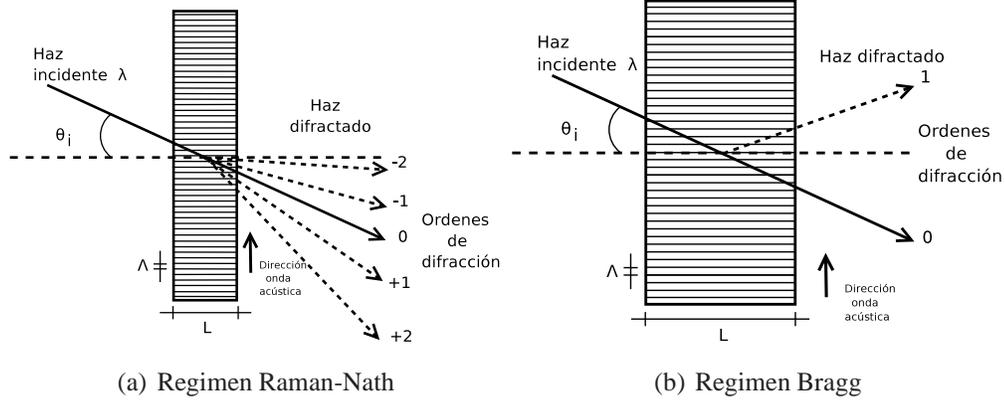


Figura 2.1: Dispersión en el regimen de Raman-Nath y Bragg

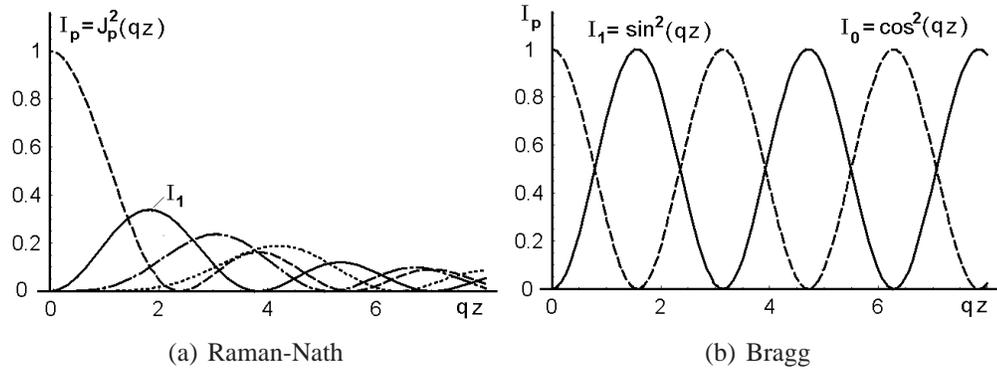


Figura 2.2: Intensidad de los órdenes de difracción en el regimen de Raman-Nath y Bragg

Las leyes de conservación inherentes a este fenómeno son

$$\vec{k}_i + \vec{K} = \vec{k}_d,$$

para los vectores de onda, con el momento ($\vec{p} = \hbar\vec{k}$) y

$$\omega_i + \Omega = \omega_d,$$

para la frecuencia angular y la energía ($E = \hbar\omega$). Normalmente en acusto-óptica convencional ω_d y $\omega_i \simeq 10^{14} Hz$ y $\omega_2 = \Omega \leq 10^9 Hz$ de modo que la razón $\Omega/\omega_1 \approx 10^5$ y la energía $E_{foton} = 10^5 E_{fonon}$, esto debido a que $c = 3 \times 10^{10} cms^{-1}$ y $V \approx 3 \times 10^5 cms^{-1}$, por lo que

$$\frac{\omega_i}{c} = \frac{\Omega}{V},$$

y

$$k_{foton} \approx K_{fonon}.$$

Ahora, si la potencia de luz y de la onda ultrasónica tuvieran el mismo orden, esta última tendría mucho más fonones que fotones en el experimento, debido a esta consideración la interacción acusto-óptica puede ser considerada como una aproximación en términos de un campo acústico

2.3. Resolución teórica del espectrómetro

2.3.1. Rango de difracción angular

La difracción del haz en un medio isotrópico no presenta mucha complejidad, ya que $\theta_i = \theta_d$, lo cual hace que el triángulo de la figura 2.3 sea isósceles ya que el índice de refracción del medio es igual en cualquier dirección. Pero para un cristal de TeO_2 que es uniaxial el análisis se complica.

Conocer el valor de este rango se puede hacer mediante el análisis geométrico de los ángulos del haz de incidencia y el ángulo del haz difractado que tomamos del análisis de Dixon [4]. De la figura 2.3 podemos ver que los ángulos de incidencia y difracción están dados por:

$$\text{sen } \theta_i = \frac{\lambda_0}{2n_i\Lambda} \left[1 + \frac{\Lambda^2}{\lambda_0^2}(n_i^2 - n_d^2) \right] \quad (2.1)$$

y

$$\text{sen } \theta_d = \frac{\lambda_0}{2n_d\Lambda} \left[1 - \frac{\Lambda^2}{\lambda_0^2}(n_i^2 - n_d^2) \right], \quad (2.2)$$

donde n_i y n_d son los índices de refracción debidos a la birrefringencia del cristal, Λ la longitud de onda de la señal acústica y λ_0 la longitud de onda del haz incidente en el vacío. Si $n_i = n_d$ veríamos que solo prevalece el primer término y hablaríamos de un cristal isotrópico, por lo que el valor del ángulo de difracción sería del orden de $\frac{\lambda_0}{n_d\Lambda}$ ya que sería del orden del doble del ángulo de incidencia.

Como podemos ver, para un medio anisotrópico, este rango se convierte en la suma de $\theta_i + \theta_d$, teniendo así:

$$\begin{aligned} \text{sen}(\theta_i + \theta_d) &= \frac{\lambda_0}{2n_i\Lambda} \cos \theta_d + \left[\frac{\Lambda}{2n_d\lambda_0}(n_i^2 - n_d^2) \right] \cos \theta_d \\ &+ \frac{\lambda_0}{2n_d\Lambda} \cos \theta_i + \left[\frac{\Lambda}{2n_d\lambda_0}(n_i^2 - n_d^2) \right] \cos \theta_i, \end{aligned} \quad (2.3)$$

de la figura 2.3 podemos ver que el vector normal al vector de onda K es compartido como una componente de k_i y k_d , teniendo

$$\frac{2\pi n_d}{\lambda_0} \cos \theta_d = \frac{2\pi n_i}{\lambda_0} \cos \theta_i,$$

por lo tanto:

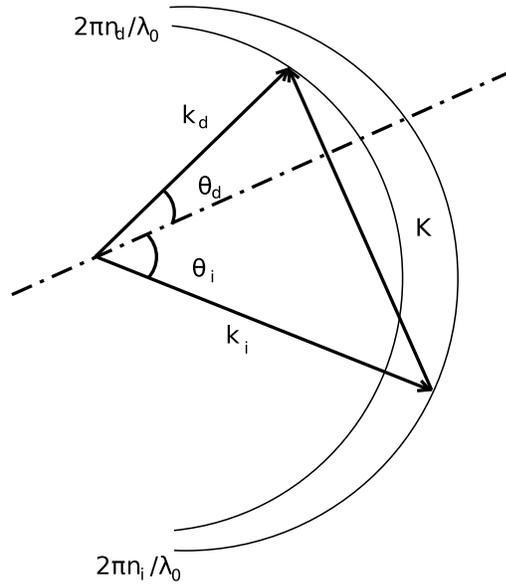


Figura 2.3: Difracción en un medio anisotrópico descrita mediante los vectores de onda del haz incidente k_i , el haz difractado k_d y la onda acústica K , con $\theta_i \neq \theta_d$

$$\cos \theta_d = \frac{n_i}{n_d} \cos \theta_i. \quad (2.4)$$

Substituyendo 2.4 en 2.3 obtenemos:

$$\sin(\theta_i + \theta_d) = \frac{\lambda_0}{2n_d\Lambda} \cos \theta_i + \frac{\Lambda}{2n_d\lambda_0} \cos \theta_i + \frac{\lambda_0}{2n_d\Lambda} \cos \theta_i - \frac{\Lambda}{2n_d\lambda_0} \cos \theta_i,$$

obteniendo así:

$$\sin(\theta_i + \theta_d) = \frac{\lambda_0}{n_d\Lambda} \cos \theta_i = \frac{\lambda_0}{n_i\Lambda} \cos \theta_d. \quad (2.5)$$

Analizando la ecuación 2.5, podemos ver que si el ángulo del haz difractado es muy pequeño respecto a la normal del vector de onda de la onda acústica, podemos aproximarlo a cero, es decir: $\theta_d \simeq 0$, y haciendo $\delta = \theta_i + \theta_d$, tendríamos que:

$$\delta = \theta_i, \quad (2.6)$$

sustituyendo 2.6 y $\Lambda = \frac{V}{f}$ en 2.5, obtenemos:

$$\tan \delta = \frac{\lambda}{V} f, \quad (2.7)$$

siendo $\lambda = \frac{\lambda_0}{n_d}$ la longitud de onda en el medio difractor.

La gráfica de las ecuaciones 2.1 y 2.2 en función de la frecuencia acústica para materiales anisotrópicos en el régimen de Bragg, se presenta en la figura 2.4, es importante

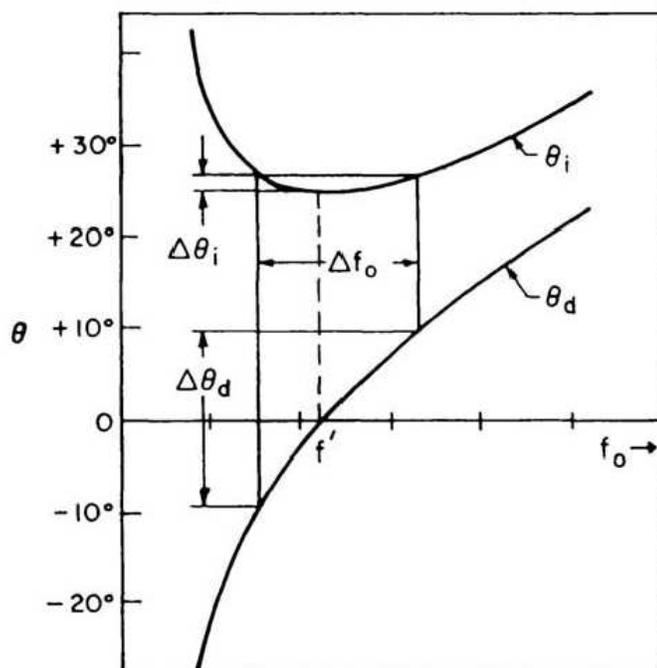


Figura 2.4: Gráfica de los ángulos incidente y refractado en función de la frecuencia de la onda acústica

hacer notar que para la óptima operación de un deflector acusto-óptico se logra en la región donde

$$\frac{d\theta_i}{df} = 0,$$

debido a que con una pequeña dispersión angular del haz incidente se pueden obtener un gran rango de difracción angular, por lo tanto grandes anchos de banda.

2.3.2. Producto Tiempo-Ancho de banda

En general, con el incremento de la frecuencia de observación la resolución en frecuencia disminuye, pero la razón entre la resolución y la frecuencia observada permanece prácticamente constante.

La interacción acusto-óptica nos lleva a la deflexión de un haz de luz en cierto ángulo proporcionalmente a la frecuencia de la onda acústica.

La resolución espectral del instrumento es determinada por el producto Tiempo-Ancho de banda [12], el cual determina la máxima cantidad posible de ángulos que se pueden resolver, N , y está definido como la razón entre el rango de deflexión angular y la resolución angular:

$$N = \frac{\Delta\theta}{\delta\theta}, \quad (2.8)$$

debido a que la CAO es modelada como una rejilla de fase gruesa con frecuencia espacial ν , la cual está definida por:

$$\nu = \frac{1}{\Lambda}, \quad (2.9)$$

donde Λ que es la longitud de onda acústica, y está definida por:

$$\Lambda = \frac{V}{f_a}, \quad (2.10)$$

donde f_a es la frecuencia y V la velocidad de la onda acústica.

El ángulo de difracción de una rejilla de fase es proporcional a la longitud de onda de la luz incidente λ , e inversamente proporcional a la frecuencia espacial de la rejilla ν , es decir:

$$\theta = \frac{\lambda}{\nu}, \quad (2.11)$$

sustituyendo la ecuación 2.9 y 2.10 en 2.11 obtenemos:

$$\theta = \frac{\lambda f_a}{V}. \quad (2.12)$$

En esta simple consideración podemos apreciar que el ángulo de difracción es una función lineal de la frecuencia acústica, por lo que pequeñas variaciones en la frecuencia acústica corresponden a variaciones en el ángulo. Sin embargo esta es una aproximación de primer orden

$$\Delta\theta = \Delta f_a \frac{\lambda}{V}, \quad (2.13)$$

Ahora bien, la resolución angular $\delta\theta$ se puede expresar usando la definición de la longitud de interacción en el deflector L

$$\delta\theta = \frac{\lambda}{L}, \quad (2.14)$$

sustituyendo 2.13 y 2.14 en 2.8, tenemos

$$N = \frac{\Delta\theta}{\delta\theta} = \Delta f_a \frac{L}{V} = \Delta f_a \tau. \quad (2.15)$$

Como podemos ver la razón de la apertura efectiva entre la velocidad del sonido es τ , también conocido como *tiempo de apertura* o *tiempo de retraso* y es el tiempo que tarda la onda acústica en recorrer la zona de interacción en el medio, el cristal en nuestro caso.

2.3.3. Resolución Espectral

La resolución espectral es un parámetro que depende fundamentalmente de la CAO. De acuerdo con [26], el cálculo de la resolución espectral lo podemos hacer mediante la siguiente fórmula:

$$\delta f = \frac{V}{L}, \quad (2.16)$$

donde V es la velocidad del sonido dentro del cristal, como podemos apreciar la longitud de la ventana óptica es fundamental para la optimización del instrumento, ya que mediante el control de la expansión del haz colimado se puede incrementar la resolución.

2.3.4. Ancho de banda

Una vez calculada la resolución espectral podemos encontrar el ancho de banda del instrumento con la siguiente fórmula:

$$\Delta f = \frac{\delta f \cdot \#CCD}{2} \quad (2.17)$$

donde $\#CCD$ es el número de píxeles del arreglo lineal de la cámara CCD. El objetivo es que una mancha ocupe solo 2 píxeles.

Capítulo 3

Montaje del espectrómetro acusto-óptico

3.1. Introducción

En la astronomía milimétrica la necesidad de utilizar espectrómetros con un gran ancho de banda se hace necesaria debido a los anchos de línea que se desean medir, como se puede ver en el gráfico 3.1 conforme aumenta la resolución, los anchos de banda requeridos son cada vez mayores.

Dentro de la primera etapa de la rehabilitación de RT5 los objetos a observar serán fundamentalmente: el sol y máseres cósmicos. Como se ha visto en estudios recientes [15], la resolución que se reportan para máseres a 43 GHz es de 34.4 KHz. Con lo que el ancho de banda para esta frecuencia no puede ser muy grande, el objetivo aquí sería mejorar la resolución espectral.

Diseños anteriores [21] mostraron dimensiones considerables, incluso se tuvieron que construir inmuebles con características especiales para su instalación y funcionamiento. Esto se debió en gran medida a las distancias focales de las lentes de enfoque, las cuales eran del orden de metros.

Una de las características por las cuales este tipo de espectrómetros se ha hecho importante para aplicaciones espaciales es su tamaño [11]. El hecho de que sea portable le da una gran ventaja sobre otro tipo de espectrómetros, por lo que las dimensiones deben ser lo más compactas posibles.

Es importante hacer notar que este tipo de espectrómetros no necesita un gran número de componentes que requieran un consumo de potencia elevado y que su funcionamiento está basado principalmente en el desempeño de la celda acusto-óptica. El diseño de las componentes a espacios cada vez más pequeños es lo que ha logrado reducir considerablemente su tamaño. Debido a esto es que este tipo de espectrómetros se han posicionado dentro de telescopios espaciales, como es el caso más reciente en la misión Herschel [5].

Hay que mencionar que no se ha requerido de manufactura de piezas mecánicas com-

plejas ya que todos los elementos que componen esta versión de laboratorio se encuentran disponibles en el mercado.

Se estableció como primer objetivo el montar las componentes ópticas en una mesa óptica de 304 x 609 mm (1 x 2 ft) de superficie con un peso aproximado de 25 kg, según las especificaciones del fabricante (ver figura A.2), logrando con esto colocarlo dentro de uno de los cubículos del INAOE sobre un escritorio de uso general donde también se instaló la computadora con la que se controlarán la adquisición y despliegue de datos así como el controlador de la CAO.

La fuente de alimentación del módulo láser es de dimensiones y peso muy portátiles lo cual la hace de fácil acomodo dentro de la mesa. El arreglo lineal de CCD está alimentado mediante la conexión USB por lo que la carga de este módulo recae totalmente en la fuente de alimentación de la computadora. La CAO se conecta a la computadora mediante el USB, sin embargo el controlador tiene una fuente de alimentación propia la cual consume niveles bajos de potencia. Todo lo anterior se puede resumir en que solo se necesitan 3 conectores a la red de 120 VAC para que el instrumento se encuentre energizado y listo para funcionar.

El espectrómetro acusto-óptico contará en la primer etapa de funcionamiento, como parte de un radiotelescopio, con 2 receptores de tipo heterodino, uno a 43 GHz y otro a 3.9 GHz [19].

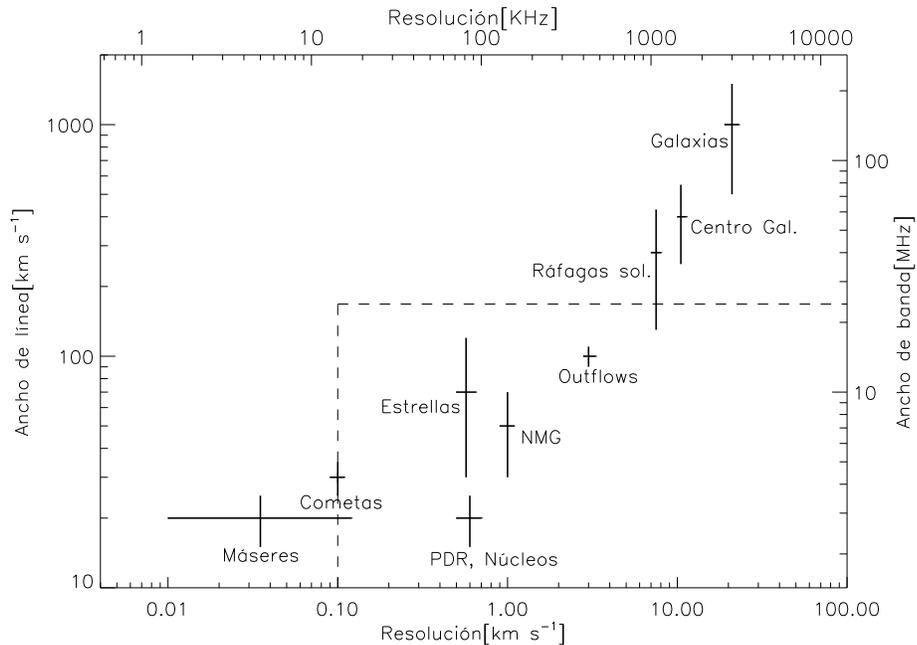


Figura 3.1: Alcances teóricos del espectrómetro acusto-óptico a 43 GHz. La línea segmentada indica el ancho de banda y la resolución teóricos del instrumento. Las barras sobre los diferentes objetos nos indican el rango de resolución y el ancho de banda con los que se han observado reportados en la literatura.

3.2. Requerimientos y características principales del EAO

3.2.1. Resolución espectral y ancho de banda

En la figura 3.1, adaptada de [6], se presenta el análisis de los alcances teóricos del espectrómetro con un receptor heterodino a 43 GHz, la línea segmentada nos indica la resolución espectral y el ancho de banda teórico del espectrómetro, los diferentes objetos astronómicos que se muestran en el gráfico nos muestran que podemos alcanzar buenas resoluciones de objetos tales como nubes moleculares, cometas y sobre todo que se pueden obtener datos relevantes de máseres y ráfagas solares, que son dos tópicos importantes para RT5. Lo que también se observa es que para objetos que requieren anchos de banda muy grandes no es necesario tener una resolución muy fina debido a que los anchos de línea son de igual manera muy grandes.

Para la espectroscopía en radiofrecuencias, debido al ensanchamiento por el efecto Doppler, es más útil usar unidades de km s^{-1} para medir la resolución y el ancho de banda, estas se encuentran relacionadas mediante la siguiente expresión:

$$\Delta\nu = \nu \frac{v}{c}, \quad (3.1)$$

donde $\Delta\nu$, es el corrimiento en frecuencia, ν la frecuencia de la línea en reposo, v la velocidad del medio emisor y c la velocidad de la luz. En la figura también podemos ver que, según lo reportado en la literatura, el tema de máseres y ráfagas solares estaría cubierto dados los alcances teóricos del instrumento, el rango de la resolución y los anchos de línea reportados en la literatura quedan dentro de estos alcances.

El principal objetivo de construir este instrumento es experimentar con técnicas instrumentales diferentes para la espectroscopía en radiofrecuencias. La instalación de una antena de 5 m (RT5) nos ha brindado la oportunidad de diseñar y construirlo.

Para la realización de este instrumento se han tomado en cuenta características tales como: tamaño, fácil manejo y transporte y sobre todo la oportunidad de tener un espectrómetro con características que los hacen factibles en telescopios espaciales, dado el bajo consumo de potencia así como su reducido número de componentes.

Por otra parte también se deben tener muy en cuenta las características que en comparación con otros espectrómetros tiene, tales como *Resolución* y *Ancho de Banda* los cuales recaen directamente en la CAO.

La resolución espectral es un parámetro global que depende principalmente de las propiedades físicas del cristal, para nuestro caso como usamos un cristal de TeO_2 donde la velocidad de propagación del sonido es de $\sim 600 \text{ m s}^{-1}$. Ahora para alcanzar una resolución de por lo menos 16 KHz necesitamos conocer el tamaño de la ventana óptica mediante la ecuación 2.16 podemos calcularla de la siguiente manera:

$$L = \frac{V}{\delta f} = \frac{600 \text{ m s}^{-1}}{16 \times 10^3 \text{ s}^{-1}} \simeq 40 \text{ mm},$$

De acuerdo con la figura 3.1, si tenemos un ancho de banda de $\sim 25 \text{ MHz}$, calculamos

cuantos píxeles necesitamos tener en un CCD de arreglo lineal, utilizando la fórmula 2.17 de la siguiente manera:

$$\#CCD = \frac{2\Delta f}{\delta f} = \frac{2 \cdot 25 \times 10^6 \text{ s}^{-1}}{16 \times 10^3 \text{ s}^{-1}} = 3125 \text{ píxeles.}$$

Comercialmente es complicado encontrar arreglos lineales con un número de elementos de esta magnitud, sin embargo se puede aproximar a adquirir una cámara de 3000 elementos las cuales son más comunes.

3.3. Diagrama modular general

La composición total del instrumento se puede dividir por bloques de la siguiente manera:

- Módulo láser
- Módulo de expansión y colimación
- Celda Acusto-Óptica (CAO)
- Módulo de enfoque
- Camara CCD de arreglo lineal

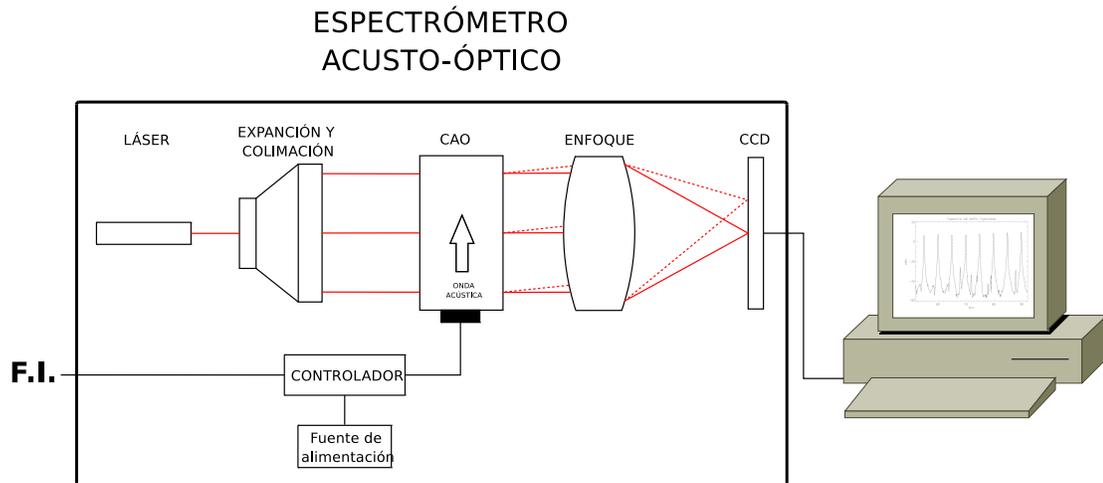


Figura 3.2: Diagrama modular del espectrómetro acusto-óptico

El corazón de este instrumento es la CAO, ya que como hemos visto la FI, la resolución espectral así como el ancho de banda son características que están en función de este bloque, la longitud de onda del láser y la expansión se hacen adaptándose a las propiedades físicas y tamaño del cristal.

Los módulos de enfoque y la cámara CCD son importantes para la optimización en la lectura de datos, ya que deben acoplarse entre ellos, además la longitud focal debe de satisfacer las necesidades de espacio dentro de la mesa óptica.

El tamaño de la mancha que se forma en el plano focal debe de estar muy bien acoplada con las dimensiones del píxel de la cámara.

En las siguientes secciones se hará una descripción de cada uno de estos módulos, se darán las características físicas y se describirán los softwares de control para los módulos que así lo requieran.

3.4. Celda Acusto-Óptica

3.4.1. Introducción

La CAO fue adquirida a la empresa Molecular Technology con sede en Berlín [16]. En la figura 3.3 se podemos ver la CAO conectada, con sus diferentes componentes, y funcionando con su software. Las componentes de la CAO son las siguiente:

- *Bloque óptico*: Caja metálica con dimensiones de 75x53x75 mm que contiene dentro el cristal acusto-óptico de Dióxido de Telurio (TeO_2), el material piezo-eléctrico que va pegado a este es de Niobato de Litio ($LiNbO_3$) y el material absorbente Indio (In), además del circuito eléctrico encargado del acoplamiento.
- *Unidad de control de RF (controlador de RF)*: Este es una caja de metal de dimensiones 110x54x18 mm, mostrado en la fig 3.4, donde se encuentra la electrónica para la generación de las señales de prueba. Tiene **4 conectores diferentes**, uno para la **alimentación de 5V**, uno tipo **SMA** para la conexión con el bloque óptico, un conector tipo **SMB** donde se conecta un generador de señal de modulación en potencia, para la operación en el modo pulso, y finalmente uno de **USB** (Universal Serial Bus) para la conexión con la computadora.
- *Software de control*: Este ha sido creado por MolTech, corre bajo la pataforma de Windows, el software es de uso sencillo aunque se deben tener varias precauciones durante el uso, mismas que están detalladas en el Apéndice B, el proceso de instalación lo describiremos más adelante.

3.4.2. Especificaciones técnicas de la CAO

- Material del cristal: TeO_2
- Longitud de onda: $633nm$
- Banda de frecuencia que se controla: $50 - 90MHz$
- Dimensión de la ventana óptica: $4 \times 40mm$



Figura 3.3: CAO conectada y funcionando con su software.

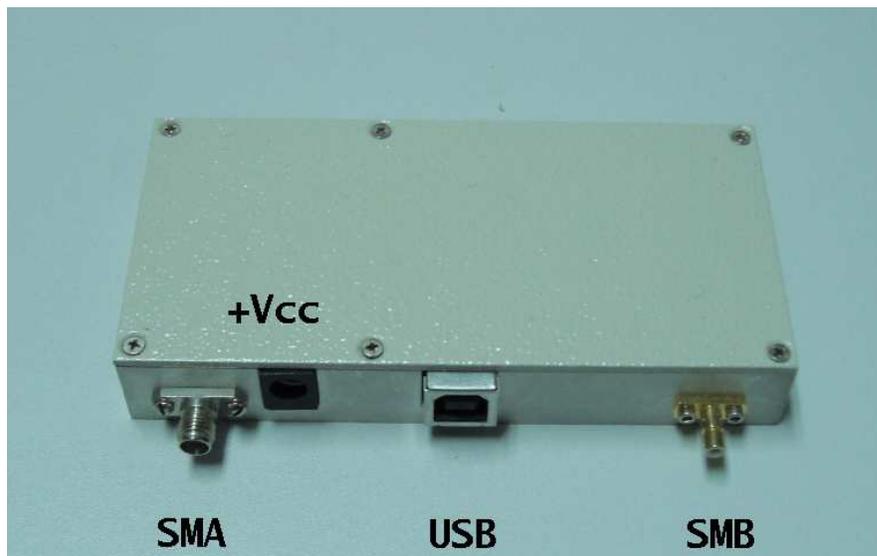


Figura 3.4: Controlador de la CAO

- Velocidad del sonido: 650ms^{-1}
- Ángulo de escaneo del haz: 2.25°
- Coeficiente de transmisión de radiación óptica: 0.95
- Eficiencia de difracción en la banda de frecuencia que se controla: 60 – 90 %
- Coeficiente de transmisión de radiación óptica: 0.95
- Razón de voltaje de onda estacionaria (VSWR): < 2.8
- Potencia máxima de la señal que se controla (promediada en tiempo): $1W$
- Impedancia: 50Ω
- Coeficiente de transmisión de radiación óptica: 0.95
- Plano de polarización del haz incidente: **Paralela a la base del bloque óptico**
- Plano de polarización del haz difractado: **Ortogonal a la base del bloque óptico**
- Coeficiente de reflexión de la capa anti-reflejante: $< 0.7\%$
- Máximo periodo de conmutación : $10^{-3}s$
- Paso mínimo de frecuencia de señal de prueba: $1Hz$
- Potencia de salida máxima del controlador de RF: $1.4W$

3.4.3. Ángulo del haz difractado

El funcionamiento de la CAO está basado en el fenómeno acusto-óptico. Una señal eléctrica aplicada a un transductor piezo-eléctrico inyecta una onda acústica en el cristal de TeO_2 provocando variaciones del índice de refracción dentro del cristal formando así una rejilla de difracción de fase en este. Esto produce la difracción de la luz con cierto ángulo θ y polarización. El valor de este ángulo (en el airey), se puede calcular con la siguiente aproximación:

$$\tan \theta = \frac{f\lambda}{V}, \quad (3.2)$$

con f frecuencia de la onda acústica, λ la longitud de onda del haz en el vacío y V la velocidad del sonido en el medio acusto-óptico.

3.4.4. Controlador

El controlador es el dispositivo que se encarga de manejar la señal que llega al circuito encargado de controlar el material piezo-eléctrico que realiza la transducción de la señal eléctrica a una onda mecánica.

El software que se encarga de enviarle los datos se llama **AOD1**, y su interfaz gráfica se muestra en la figura 3.5 y 3.6, siendo esta segunda solo otra pantalla que se muestra dentro de la misma ventana en la cual se accede al control de otros parámetros.

En la figura 3.5 se aprecia las condiciones de conexión con el controlador, nos indica el estatus de conexión del mismo.

La señal que se inyecta a la CAO cuenta con dos modos principales de operación: *modulación interna* y *modulación externa*.

En el primer modo la señal que se inyecta al piezo-eléctrico es un tren de pulsos rectangulares en donde el periodo de duración de la señal presente es $T/2$, con una frecuencia de pulso igual a t , estos puede llegar a una frecuencia máxima de 1.5 KHz, es controlada directamente mediante el software de control, al pulsar el boton *Sweep frequency* se desplegará en la misma ventana otra pantalla, donde se puede programar un barrido de señales (ver figura 3.6), dentro del rango de 50 a 90 MHz, además de controlar los parámetros siguientes:

- Frecuencia inicial (en Hz) *Starting frequency*
- Incremento de frecuencia (en Hz) *Frequency Step*
- Numero de incrementos (0-65536) *Number of frequency Step*
- Potencia (en unidades relativas 0 - 1023) *Power parameter*

En la *modulación externa*, la señal que modulará al cristal será recibida de la etapa anterior del esquema del radiotelescopio, es decir la FI proveniente del receptor, la cual contendrá la información de la señal astronómica que queremos analizar.

3.5. Módulo láser

3.5.1. Introducción

Con la aparición del láser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, por sus siglas en inglés ó Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación) en los años 60, las aplicaciones que requerian una muy alta coherencia en la luz comenzaron a desarrollarse más rápidamente. En nuestro caso el haz de luz láser es un módulo fundamental, ya que al ser una fuente de luz coherente nos permite optimizar la difracción y mediante la deflección de este, y con efecto acusto-óptico, podemos construir el espectro de una señal imprimiendolo en un arreglo lineal de fotodetectores, utilizando este como un plano de frecuencia. Razón por la cual el tamaño de la cavidad resonante de este módulo es fundamental para el espacio que ocupe dentro de la mesa óptica.

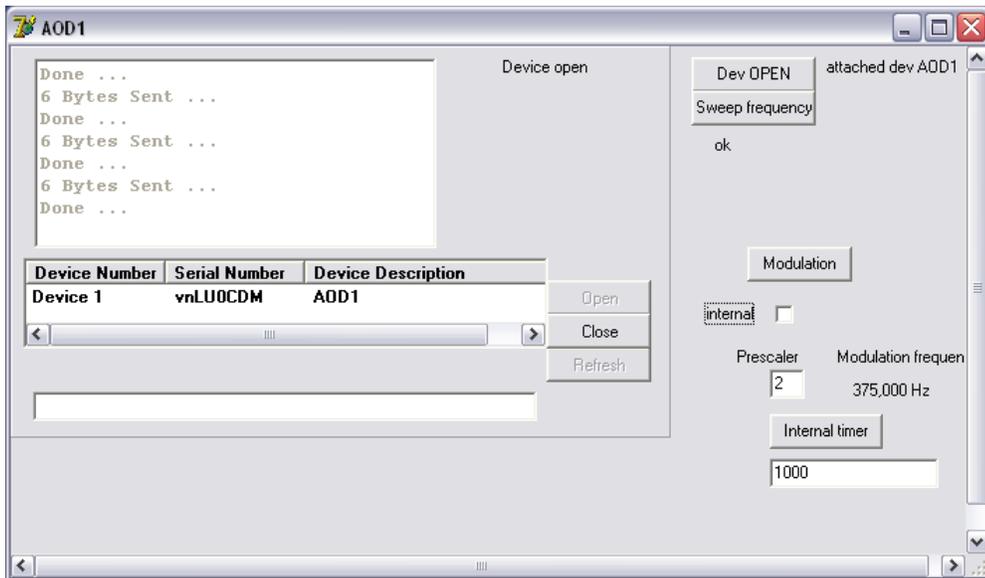


Figura 3.5: Interfaz gráfica del software de control **AOD1**. Mediante este podemos enviar señales de RF de FI hacia el transductor piezo-eléctrico

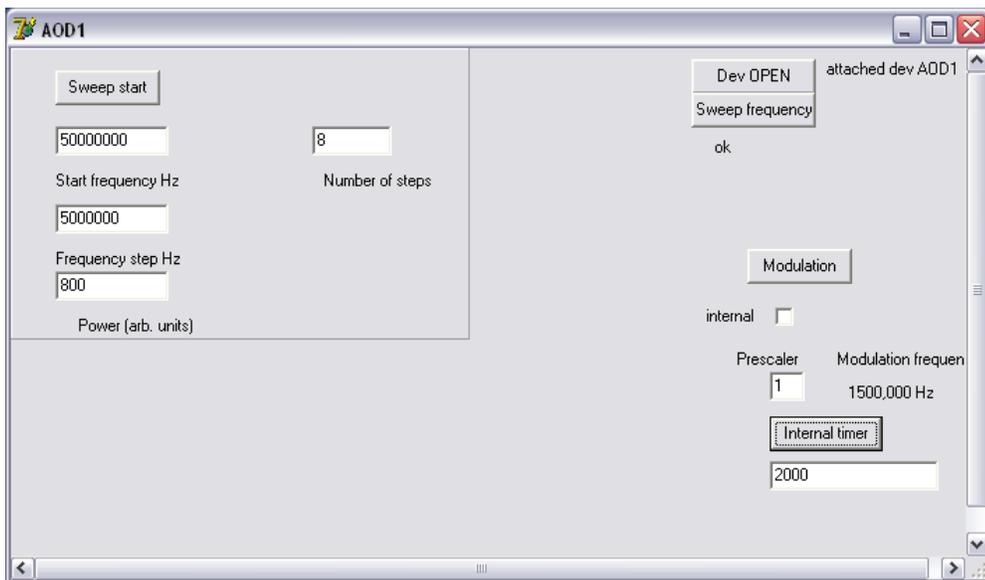


Figura 3.6: Pestaña de control de parámetros. Una vez conectada y detectado el cristal puede uno ajustar los parámetros de la señal que se genera mediante la modulación interna.

Láser He-Ne

Los láseres de gas se caracterizan por tener como medio activo un gas atómico. La estructura del nivel de energía de un gas de baja densidad se aproxima a la de un átomo

aislado con transiciones entre niveles individuales o quizá en algunos grupos de niveles muy próximos entre sí.

En un láser de gas, el medio activo está encerrado en un tubo cilíndrico a una presión baja (algunos milli-torrs). Con la mayoría de los elementos se puede hacer un láser cuando están en el estado de gas.

El láser He-Ne fue el primer láser gaseoso en funcionar y también fue el primero en producir un haz de salida continuo en 1961 por Ali Javan, funcionando en una longitud de onda de 1152,27 nm (cerca de infrarrojo). El láser He-Ne era el láser más común hasta la extensión de los láseres de diodo en los últimos años.

El medio activo es una mezcla gaseosa de helio y neón, en proporción aproximada de 10:1, contenida en un tubo de cuarzo cerrado. Se crea una descarga brillante en el gas mediante la aplicación de un alto voltaje de entre 1 y 10 000 volts entre un par de electrodos insertados en extremos opuestos del tubo. Una vez encendido, para mantener la descarga basta una corriente directa estable típicamente de entre 3 a 10 mA. La corriente eléctrica que fluye produce excitación de los átomos de helio debido a colisiones con los electrones energizados. A su vez, los átomos excitados de He transfieren parte de esta energía, mediante colisiones atómicas, a los átomos de Ne, con lo que éstos son elevados a sus niveles de excitación superiores. En este nivel se establece una inversión de población y puede llevarse a cabo el efecto láser a una longitud de onda de 632.8 nm. Es importante observar que los átomos de He proporcionan el medio para excitar los átomos de Ne; el efecto láser se lleva a cabo en los niveles del Ne.

El efecto láser continúa en tanto sea posible mantener la inversión de poblaciones y sea emitido un haz continuo con potencias en el intervalo de 0.5 a 50 mW. La ganancia del láser de He-Ne a esta longitud de onda es baja y sólo es posible permitir pequeñas pérdidas de cavidad, lo que implica el empleo de espejos de alta calidad con bajas pérdidas por dispersión y absorción. Los anchos de línea en los láseres gaseosos son mucho más bajos que en cualquier otro tipo de sistema láser. En particular, para el láser He-Ne los anchos de línea suelen ser del orden de unos cuantos picómetros.

En los láseres de He-Ne baratos de baja potencia, hasta aproximadamente 1mW, los espejos están fijos directamente al tubo de descarga. En las versiones de alta potencia, los espejos son externos al tubo de descarga y este debe estar sellado con ventanas de ajuste.

Estas ventanas están inclinadas a un ángulo específico con respecto al eje óptico, el ángulo de Brewster. Cuando se hace incidir luz no polarizada sobre una pieza de cristal o cuarzo inclinada a su ángulo de Brewster, sólo son transmitidas componentes de luz polarizada en el plano de la ventana. Las demás componentes son reflejadas y la luz emerge plenamente polarizada.

3.5.2. Láser HRP-120

De acuerdo con el diagrama 3.2, el primer módulo que tenemos es el concerniente al láser, que se muestra en la figura 3.7. Este es un láser de tipo He-Ne marca Thorlabs y modelo HRP-120, cuyas especificaciones técnicas son:

- $\lambda : 633nm$
- Potencia: $12mW$
- Polarización: *lineal*
- Diámetro de haz: $0.88@1/e^2$ y $0.51@FWHM$
- Divergencia: $0.92mrad$



Figura 3.7: Láser He-Ne HRP-120

Este tipo de láseres presentan la gran ventaja de que tienen muy poca divergencia en el haz, la forma de este está bien definida (circular o elíptico), sin embargo son de manejo delicado, la cavidad resonante suele ser del orden de decenas de centímetros por lo que hace se debe tener mucho cuidado al momento de trabajar con ellos. El soporte debe ser lo suficientemente robusto para su uso adecuado.

3.6. Módulo de expansión y colimación

3.6.1. Introducción

Este módulo es muy importante para el desempeño total del instrumento, ya que como podemos ver en la expresión 2.16, la resolución espectral depende explícitamente de la correcta iluminación de la ventana óptica, que de acuerdo con las especificaciones



Figura 3.8: Expansor de Haz de Thorlabs con su montura y la pieza fabricada en el taller mecánico del INAOE

descritas en la sección 3.4.2 tiene una dimensión de 4 x 40 mm, esta se tiene que iluminar completamente para obtener la máxima resolución espectral posible.

Tener un haz colimado es importante debido a que con el módulo de enfoque se concentrarán los haces difractados por la CAO en un arreglo lineal de CCD, y si los rayos del haz divergen o convergen el perfil de la mancha de enfoque se verá ensanchada provocando que se utilicen más pixeles para su detección afectando directamente la resolución espectral.

3.6.2. Expansor de haz Thorlabs BE15M-A

Para este montaje se ha adquirido un expansor fabricado por Thorlabs, mostrado en la figura 3.8 con las siguientes características:

- Magnificación: 15x
- Máxima apertura de entrada: 3 mm
- Error de frente de onda : $\lambda/4$
- Rango de trabajo: 350 - 650 nm

Como podemos apreciar la expansión se realiza mediante el uso de lentes, de esta forma la expansión se hace de manera simétrica.

3.7. Módulo de enfoque

3.7.1. Introducción

Este módulo tiene como objetivo fundamental enfocar los haces difractados en el arreglo lineal de CCD. Es por esto que se tienen que evaluar dos aspectos principalmente: el tamaño de la mancha formada en el plano focal y la longitud focal posterior.

En el primer caso es necesario conocer esta magnitud en función del número de pixeles que abarque en el CCD y el segundo nos define el plano de detección, es decir la distancia a la cual colocaremos el detector CCD y que además tiene que adaptarse a las restricciones de espacio.

3.7.2. Sistema Edmund TECHSPEC High Resolution Large Format Lenses 0.7x

Tomando como base lo anterior, se adquirió es sistema de lentes TECHSPEC High Resolution Large Format Lenses 0.7x a la compañía Edmund Optics, que tiene las siguientes especificaciones técnicas:

3.7.3. Especificaciones técnicas

- Aumento : 0.7X
- Apertura (f/#): F4 - 22
- Rango de aumento: 0.65 - 0.78X
- Distancia de trabajo (a aumento nominal): 223mm
- Distorsion: 0.1 % max

3.8. Cámara CCD de arreglo lineal

3.8.1. Introducción

Un CCD (siglas en inglés de *charge-coupled device* ó dispositivo de carga acoplada) es un circuito integrado que contiene un número determinado de condensadores enlazados o acoplados. Bajo el control de un circuito interno, cada condensador puede transferir su carga eléctrica a uno o a varios de los condensadores que estén a su lado en el circuito impreso. La alternativa digital a los CCD son los dispositivos CMOS (complementary metal oxide semiconductor) utilizados en cámaras digitales y en numerosas Webcam. En la actualidad los CCD son mucho más populares en aplicaciones profesionales y en cámaras digitales.



Figura 3.9: Sistema de lentes de enfoque Edmund con su montura y acoplado a una cámara CCD

3.8.2. Estructura básica de un CCD

Los detectores CCD, al igual que las células fotovoltaicas, se basan en el efecto fotoeléctrico, es decir, la conversión espontánea en algunos materiales de luz recibida en corriente eléctrica. La sensibilidad del detector CCD depende de la eficiencia cuántica del chip, la cantidad de fotones que deben incidir sobre cada detector para producir una corriente eléctrica. El número de electrones producido es proporcional a la cantidad de luz recibida (a diferencia de la fotografía convencional sobre negativo fotoquímico). Al final de la exposición los electrones producidos son transferidos de cada detector individual (fotosite) por una variación cíclica de un potencial eléctrico aplicada sobre bandas de semiconductores horizontales y aisladas entre sí por una capa de SiO_2 . De este modo el CCD se lee línea a línea aunque existen numerosos diseños diferentes de detectores.

En todos los CCD el ruido electrónico aumenta fuertemente con la temperatura y suele doblarse cada 6 u 8 °C. En aplicaciones astronómicas de la fotografía CCD es necesario refrigerar los detectores para poder utilizarlos durante largos tiempos de exposición.

3.8.3. Cámara LC1-USB

La cámara con la que contamos es de la marca Thorlabs y cuenta con la ventaja de venir montada dentro de un chasis con múltiples opciones de acoplamiento mecánico con sistemas ópticos comerciales tales como la montura tipo F. Presenta la ventaja

de no necesitar tarjetas de adquisición y conversión de datos analógico a digital y la transferencia de datos se hace mediante el protocolo del Universal Serial Bus (USB) con velocidades de transferencia desde 12 a 480 Mb/s.

Los controladores y el software de adquisición de datos vienen incluidos de fábrica, con esto podemos empezar a capturar y almacenar los datos muy fácilmente.



Figura 3.10: Arreglo lineal de CCD LC1-USB de Thorlabs

3.8.4. Especificaciones y características

Las especificaciones técnicas de la cámara son:

- Número de píxeles: 3000
- Dimensión por píxel: $7 \times 200 \mu\text{m}$
- Convertidor A/D de 12 bit
- Tiempo de integración (ajustable): $1 \mu\text{s} - 200 \text{ms}$

3.8.5. Software de adquisición de datos spectra.exe

El software utilizado para la captura y despliegue de datos del CCD se llama *spectra* y funciona bajo la plataforma Windows. Este software nos permite controlar los siguientes parámetros de la cámara:

- Número de imágenes que se toman para promediarlas y desplazarlas (SPA) y

- Tiempo de integración (Int. time)

En la figura 3.11 podemos ver la imagen de la interfaz gráfica de *spectra*. Esta se compone de una barra de control general y una ventana interna donde se grafican los datos capturados (imágenes).

En la barra de control general se maneja el inicio y el fin de la captura (botón GO y STOP), el número de imágenes que se promedian (SPA) y el tiempo de integración. En la ventana interna se manejan las opciones de abrir, guardar, imprimir, etc. En esta ventana también se pueden comparar gráficamente varias imágenes, ya que podemos desplegar varias simultáneamente, e incluso hacer operaciones algebraicas, ajustes a funciones gaussianas, localización de máximos, etc.

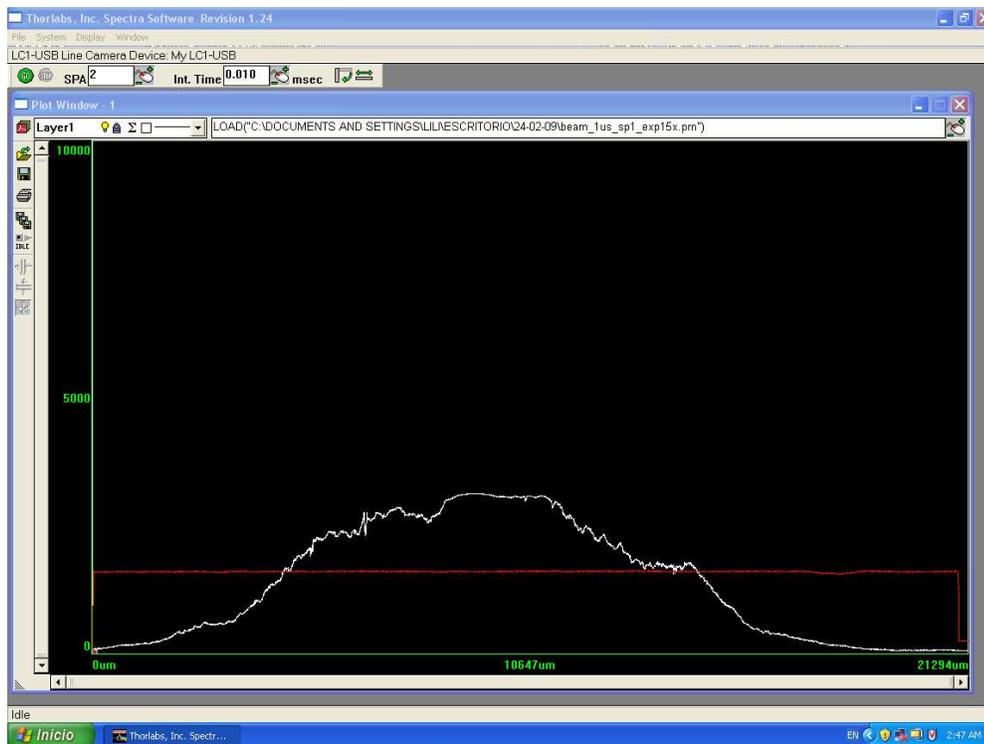


Figura 3.11: Interfaz gráfica del software **spectra**, con el cual se puede manipular el tiempo de integración, además de poder descargar los datos a una computadora. El eje de las abscisas nos indica el número de pixel y el de las ordenadas el número de cuentas

3.9. Manufactura de piezas mecánicas y ópticas

Para comenzar el montaje de laboratorio se debe tomar en cuenta que tener cierto número de grados de libertad para cada componente mecánica es de suma importancia para hacer los ajustes necesarios para el óptimo desempeño, sin embargo no se debe tener

un gran número de estos ya que puede provocar que el ajuste se haga muy engorroso, provocando que para hacer la más mínima corrección se tenga que hacer muchos ajustes precisos lo cual no es factible para un instrumento que se tiene que transportar hasta el sitio donde se va a utilizar.

Es fundamental definir bien el plano óptico y mantener muy bien alineados los diferentes módulos con este. También tenemos que adecuarnos a las dimensiones de la mesa óptica que tiene medidas de 305 x 509 mm (1 x 2 ft.). Debido a que el expansor de haz es un telescopio tipo galileano, este ocupa una buena parte del espacio disponible, así como las monturas para la CAO y las distancias focales del módulo de enfoque.

3.9.1. Ajuste de altura del expansor BE15M-A y base de fijado del bloque óptico de la CAO

La compra de la montura para el expansor de haz, y el expansor mismo, se hizo al mismo fabricante: Thorlabs, pero quedó muy grande ya que el diámetro de la zona de sujeción del expansor es de 2" y la del soporte es de 4" (ver figura A.6 y A.4 de apéndice A), por lo que surge la necesidad de construir una pieza que acople la montura con el expansor. Es así como al diseñar esta pieza se vio la oportunidad de dar un grado más de libertad para poder ajustar la altura sin necesidad de elevar toda la montura (figura A.5).

La pieza que se fabricó se muestra en el figura 3.12, es un anillo de aluminio de 4" de diámetro con la zona de montaje no concéntrica, así es como solamente con girar el anillo y haciendo leves ajustes a la posición donde se fija sobre la mesa óptica podemos variar la altura.



Figura 3.12: Pieza para ajuste de montura de expansor de haz construida en el taller mecánico de INAOE.

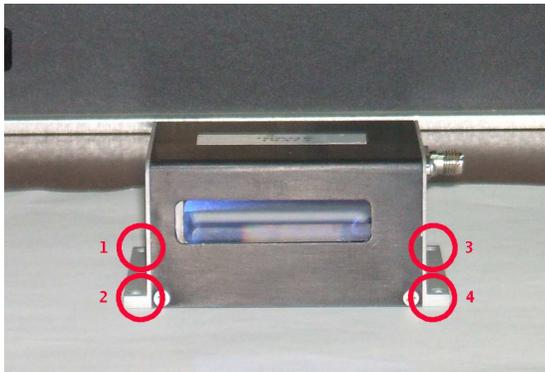


Figura 3.13: Orificios de sujeción del bloque óptico de la CAO.

Otra pieza manufacturada en el taller mecánico del INAOE fué la placa donde se fija el bloque óptico de la CAO. Como podemos ver en la figura 3.13, el bloque óptico tiene 4 orificios de sujeción y la montura [17] destinada para este fin no tiene barrenos ni al diámetro ni a la distancia de estos, así que fue necesaria la manufactura de una base donde se pudiera fijar este bloque acoplándolo con la montura.

A pesar de que con esta pieza se gana altura se adaptó convenientemente para ajustar al plano óptico, además no se tuvo que desarmar la montura para perforar los orificios para los tornillos de fijado del bloque óptico, por lo que la precisión del fabricante está garantizada.

3.9.2. Espejos

La necesidad de poner un par de espejos surgió debido a las dimensiones de la mesa óptica, ya que el espacio restante en la mesa después del módulo de expansión y colimación es corto, se introducen un par de espejos para cambiar la dirección del haz, sin embargo esto hace que la alineación de los mismos sea fundamental y precisa ya que, de no alinearse bien, la iluminación sobre la ventana del bloque óptico no sería uniforme y ortogonal. Los espejos fueron fabricados en el Taller de Óptica del INAOE con con las siguientes características:

- Diámetro = 60 mm
- $\lambda = 630 \text{ nm}$
- Error de frente de onda = $< \lambda/4$

El diámetro de los espejos se calcula en función del ancho de la ventana del bloque óptico (40mm), y de la dirección en la que queremos reflejar el haz expandido (45°). Esto se hace para iluminar ortogonalmente respecto al plano de la ventana del bloque óptico. Con esto se calcula el diámetro de los espejos siendo este de 60 mm.

Tener un haz colimando es importante debido a que con el módulo de enfoque se concentrarán los haces difractados por la CAO en un arreglo lineal de CCD, y si los rayos del haz son divergentes o convergentes, la mancha de enfoque se verá ensanchada provocando que se utilicen más píxeles para su detección afectando directamente a la resolución espectral.

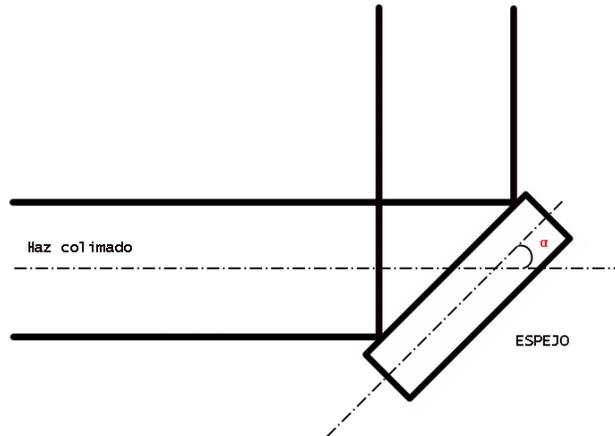


Figura 3.14: Diagrama de colocación de los 2 espejos que son utilizados para cambiar la dirección del haz expandido. El ángulo α es de 45° para garantizar la ortogonalidad.



Figura 3.15: Imagen de espejos de 60 mm de diámetro fabricado en el taller de óptica del INAOE.

3.10. Esquema de montaje modular

El esquema dibujado con AUTOCAD v.2007 del montaje final se puede apreciar en la figura 3.16, como es un montaje para laboratorio aún no se han optimizado algunas componentes, pero el dibujo a escala nos da la perspectiva real del acomodo de los distintos módulos dentro de la mesa óptica.

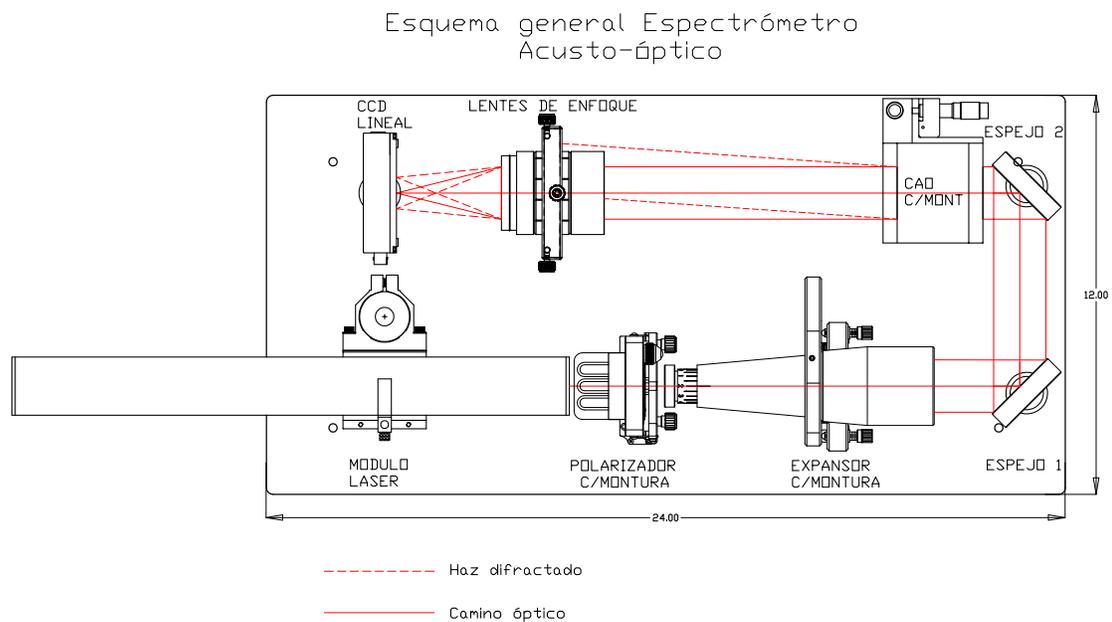


Figura 3.16: Diagrama general del espectrómetro acusto-óptico con las componentes actuales. Las líneas rojas indican el camino óptico, la línea punteada indica el haz difractado.

Capítulo 4

Desarrollo de pruebas y análisis de resultados

4.1. Introducción

En esta versión de laboratorio del espectrómetro acusto-óptico el principal objetivo es reproducir un espectro cualitativo de una señal conocida comparándola con el espectro obtenido con otro instrumento, en este caso un analizador de espectro. Midiendo así como se comporta el ángulo de difracción en función de las diferentes componentes de frecuencia de la onda acústica.

Un primer requisito es construir un instrumento compacto y ligero que haga fácil su manejo y transporte. Como las componentes que se adquirieron no están optimizadas en tamaño para este proyecto, se buscó la mejor manera de acomodarlas para ocupar el espacio disponible dentro del área de la mesa óptica, como se ha mostrado en el esquema de la figura 3.16.

Como primer paso hacia la integración de las diferentes componentes se han planteado una serie de arreglos experimentales para determinar los alcances que se pueden obtener con estas. Para esto se aplicaron individualmente diversas pruebas, concluyendo con el montaje en conjunto de la versión de laboratorio para obtener los primeros resultados del instrumento.

Componentes como el módulo láser, el expasor de haz y el sistema de lentes de enfoque son las que utilizan un espacio considerable. Para el láser es importante evaluar el perfil del haz y su estabilidad en potencia.

Con el expansor de haz, se busca iluminar la mayor parte de los 40 mm de ventana óptica de la CAO, que también conocemos como longitud de interacción L , para optimizar la resolución espectral, que es la característica que se obtiene directamente de la geometría y propiedades físicas del cristal de la CAO (ver sección 2.3.3).

Para el sistema de lentes de enfoque es necesario medir la longitud focal posterior (lfp), ya que a esta distancia se debe colocar el arreglo lineal CCD para las medición tanto del ancho de la mancha en el plano focal, así como para manter la alineación con el eje

de difracción del haz que proviene de la CAO.

La evaluación del módulo de enfoque es muy importante debido a dos factores principales: por un lado el tamaño de la *mancha* que se genera mediante la concentración del haz difractado en el plano focal modifica la resolución que podremos detectar con nuestro arreglo lineal de CCD y por otro lado la distancia que cubrirá la difracción del haz en el plano donde colocamos el arreglo lineal de CCD, la cual está en función tanto del rango de difracción angular (sección 2.3.1), como de la lfp.

En el caso del expansor de haz y del bloque óptico de la CAO, se manufacturaron piezas que permitieran su acomplamiento con sus respectivas monturas (ver A.5 y A.7).

El montaje de la versión de laboratorio se muestra en la figura 4.17 y el primer espectro sintético se muestra en la figura 4.18.

4.2. Pruebas al módulo láser

4.2.1. Patrón de difracción

Como una de las pruebas iniciales se decidió medir el patrón de difracción de una rendija circular midiendo el diámetro del máximo principal del patrón de difracción. El arreglo experiencial se colocó como se muestra en la figura 4.1. La fuente de luz coherente es el láser HRP-120 (cuyas características se describen en la sección 3.5.2), utilizando un polarizador lineal para controlar la intensidad del haz y una rendija circular de $25\mu\text{m}$ de diámetro. El arreglo lineal CCD se colocó a 140mm de distancia de la rendija. Para calcular el diámetro del disco de Airy, utilizamos la siguiente fórmula [7]:

$$d = 2.44 \frac{R\lambda}{D},$$

con R como la distancia a la cual se coloca la pantalla (detector CCD), D el diámetro de la rendija y λ la longitud de onda del láser (633nm).

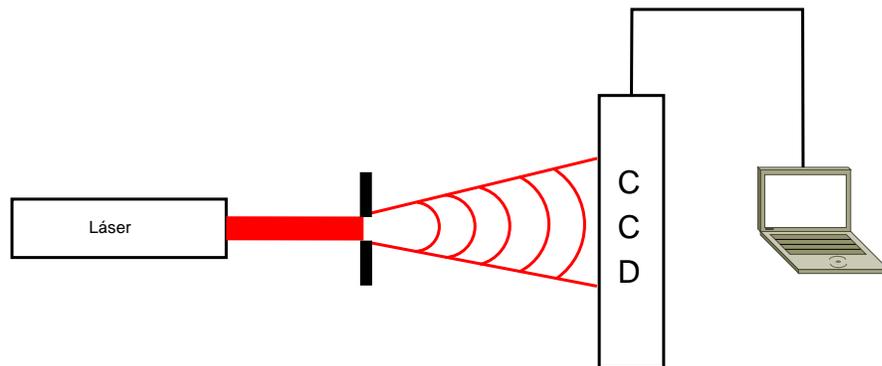


Figura 4.1: Esquema del montaje para la obtención del patrón de difracción de una rendija circular de $25\mu\text{m}$ de diámetro capturado con el arreglo lineal de CCD de Thorlabs.

El patrón de la intensidad de la luz se muestra en la figura 4.2.

En la tabla 4.1 se presentan los valores teóricos y medidos para el patrón resultante, como podemos ver la diferencia respecto al teórico en el caso del disco es de apenas un 0.5 % y para el máximo del segundo lóbulo encontramos que la diferencia respecto al teórico es de un 8 %.

Parámetro	Teórico	Medido
Diámetro Disco Airy (μm)	8640	8690
Amplitud del 2o. lóbulo respecto al principal	0.0175	0.016

Tabla 4.1: Comparación de los valores teóricos con los medidos del patrón de difracción.

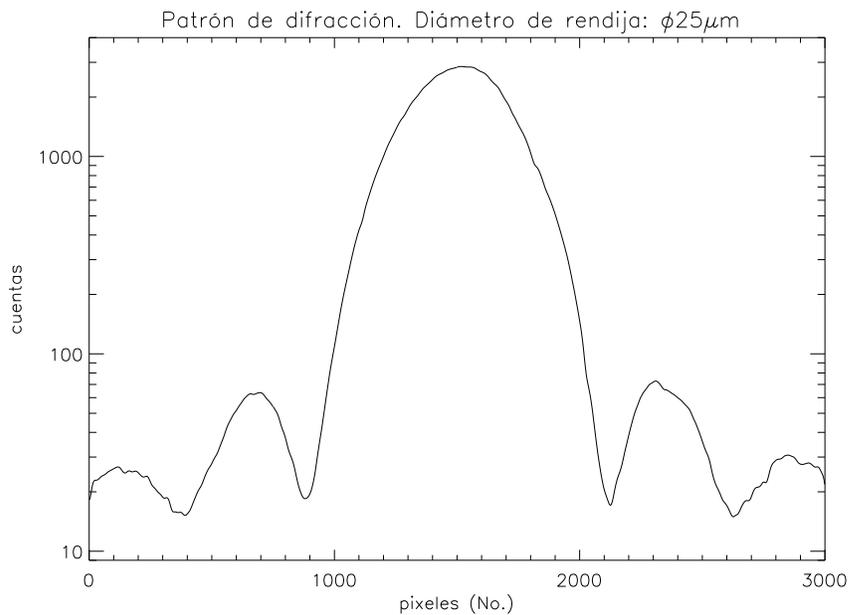


Figura 4.2: Patrón difracción de rendija circular

4.2.2. Perfil del haz

El perfil del haz de nuestro módulo láser es de tipo gaussiano según especificaciones, sin embargo como parte de estas pruebas preliminares se tomó una imagen del perfil con el arreglo lineal de CCD. Para hacer la medición utilizamos el arreglo lineal de 3000 píxeles (descrito en la sección 3.8), debido a la potencia del láser (~ 12 mW) se utiliza el polarizador para tener control de esta. El perfil tomado se muestra en la figura 4.3, donde debido a la divergencia podemos apreciar un ensanchamiento del haz.

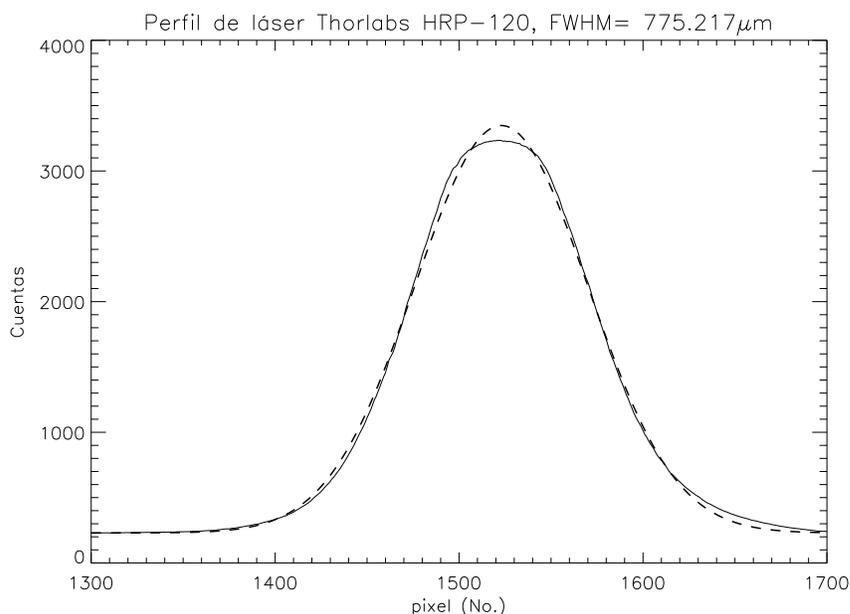


Figura 4.3: Perfil tomado con la arreglo CCD lineal. El ajuste gaussiano es la línea segmentada.

Con el ajuste podemos medir el FWHM, encontrando que este es de ~ 0.77 mm. Si tomamos en cuenta que por especificaciones el ancho nominal a esa altura es de ~ 0.52 mm vemos que el haz se ensancha $\sim 50\%$ lo que se nos indicaría que el ángulo divergencia del haz es considerable, pero hay que remarcar que con el uso del polarizador lo que se modifica es justamente la potencia del haz, el ancho nominal está medido a su potencia nominal y para nuestra medición modificamos el nivel de potencia lo suficiente para evitar la saturación del arreglo lineal de CCD.

4.2.3. Estabilidad en potencia

Todo módulo láser tiene un tiempo de estabilización, es decir, al encenderlos no entregan la potencia que nos indica el fabricante, se necesita dejar funcionar el dispositivo cierto tiempo para obtener una potencia constante. Inclusive muchas veces el nivel de potencia que viene indicado es un nivel máximo posible, por lo que medir la cantidad de radiación se hace necesario así como el tiempo que se necesita para alcanzar la estabilidad.

Las mediciones para encontrar esta estabilidad en nuestro módulo láser se hicieron como a continuación se describe: se registró la primer lectura del nivel de potencia unos segundos después del encendido del láser, posteriormente se registraron los niveles medidos durante un periodo total de operación de 140 minutos en intervalos de 5 minutos con la ayuda de un detector de radiación sin atenuación, la gráfica de los valores medidos se presentan en la figura 4.4.

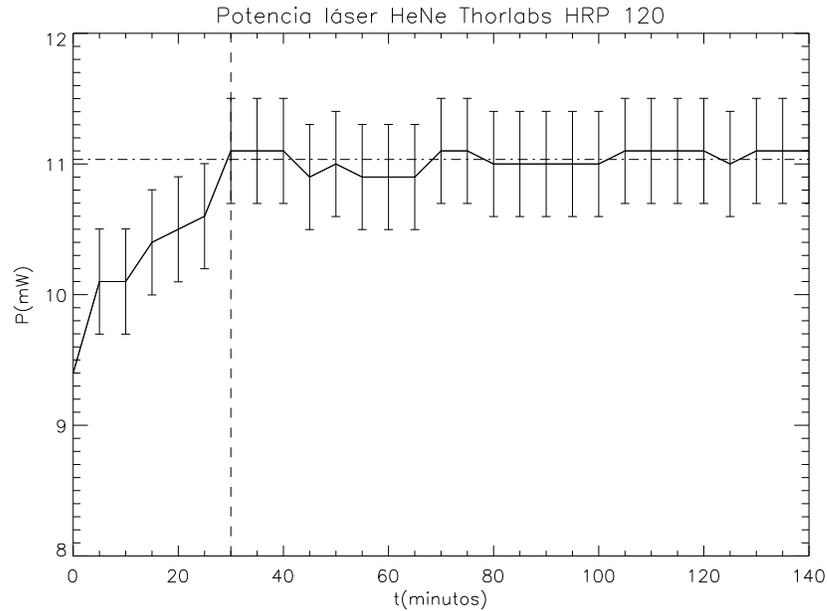


Figura 4.4: Medición de la estabilización de la potencia

En las mediciones mostradas en la figura 4.4 podemos ver que después de 30 minutos de funcionamiento hay una estabilización en la potencia medida (línea segmentada paralela al eje de las ordenadas), después de este periodo comienza la estabilización. Una vez que se alcanza la estabilidad, obtenemos que la potencia promedio es de 11.03 ± 0.077 mW.

4.3. Evaluación y desempeño de la expansión y colimación del haz

Dadas las especificaciones técnicas de nuestro módulo expansor de haz (ver sección 3.6.2). Para la evaluación de este módulo hemos utilizado el mismo láser que en las pruebas anteriores, cuyas características están en la sección 3.5.2, y la imagen obtenida de la expansión se registró con ayuda del arreglo lineal de CCD.

El perfil del haz expandido y colimado se muestra en la figura 4.5. Con la ayuda del software **spectra** se hizo el mejor ajuste posible una función gaussiana, el cual se muestra con línea sólida en la gráfica, se obtuvo un ancho a potencia media (FWHM) de ~ 8.5 mm, lo que comparamos con el ancho del perfil medido en la sección 4.2.2, encontramos que la amplificación es de $\sim 16x$.

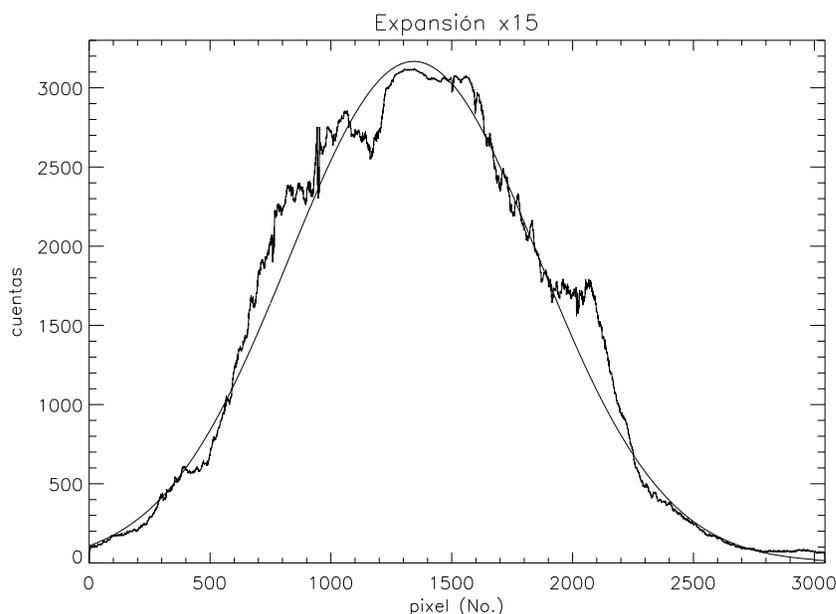


Figura 4.5: Haz láser expandido con lentes y registrado en el arreglo CCD lineal, la línea sólida es un ajuste realizado con la ayuda del software *spectra* (ver sección 4.2.2).

4.4. Pruebas y análisis de la señal inyectada a la CAO

Como primera parte del análisis se hace incidir un haz láser (He-Ne) en la ventana del bloque óptico y con la ayuda del controlador de la CAO, se genera una señal de prueba la cual se inyecta al transductor piezo-eléctrico observando así la difracción del haz. Colocamos una pantalla donde mediremos la variación del ángulo en función de la frecuencia de la onda acústica. Teóricamente podemos calcular este ángulo con la fórmula 3.2.

Las señales que genera el controlador son pulsos modulados por una señal rectangular de periodo T , este periodo puede ser modificado mediante el software de control, la señal generada tiene una duración de $T/2$ como se muestra en el figura 4.6. El software también nos ayuda a hacer barridos de señal en forma de bucle, de tal modo que uno define la frecuencia inicial (en Hz), la cantidad de pasos (1-65536) y la potencia de la misma en unidades arbitrarias (1-1023 ua).

Para este análisis la señal de FI que se está inyectando al transductor piezo-eléctrico es la que se genera de manera interna con la ayuda del controlador de la CAO (ver sección 3.4.4).

Es importante tener una referencia para los resultados que se vayan obteniendo, razón por lo que se obtuvo un espectro de un barrido de señales con la ayuda de otro instrumento.

En la figura 4.7 se muestra el espectro de potencias medido con la ayuda de un analizador de espectro, los parámetros que se programaron para la señal de entrada fue hacer

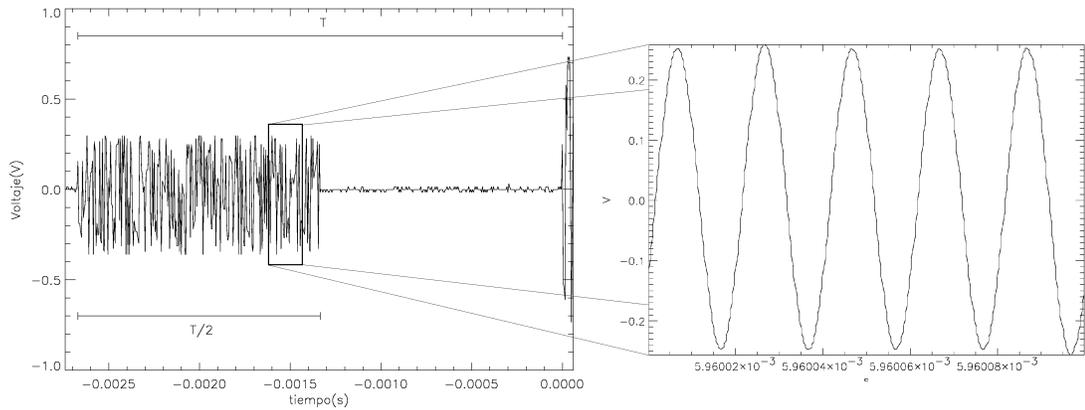


Figura 4.6: Señal modulada inyectada, mediante el uso del controlador, al transductor piezo-eléctrico. El periodo T se modifica mediante la variación del parámetro “PRESCALER” en el software de control de la CAO. Como se puede ver el tiempo de pulso es $T/2$, el resto no se inyecta señal alguna hasta iniciar de nuevo el periodo, donde la señal generada es la frecuencia inicial más el paso programado (Frequency start + Step frequency).

un barrido desde 50 hasta 90 MHz, con pasos de 5 MHz, y una frecuencia de pulsos de 1.5 KHz.

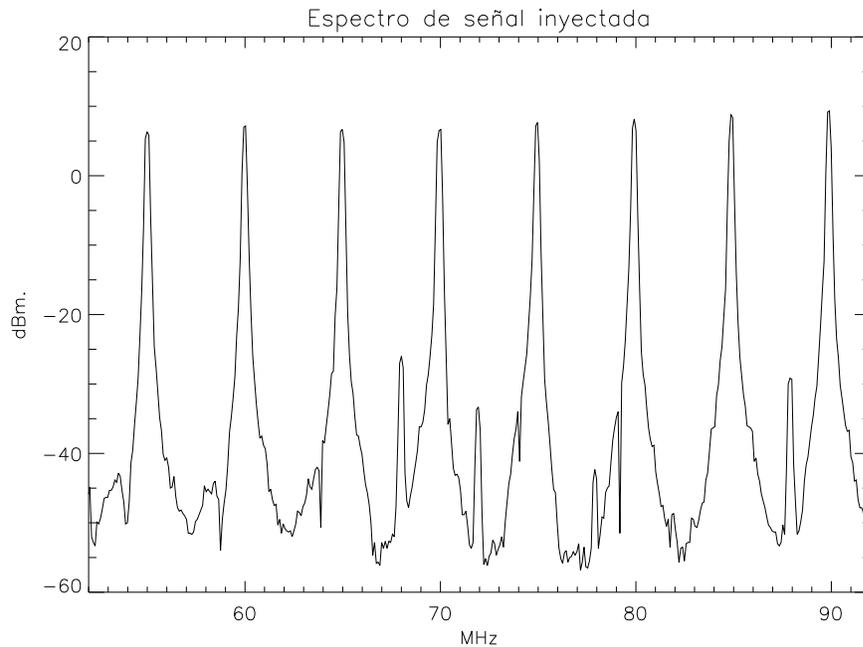


Figura 4.7: Espectro de potencia del barrido en frecuencia desde 55 hasta 90MHz con pasos de 5MHz tomados con una analizador de espectro.

Como podemos ver en la figura 4.7, esta señal inyectada presenta multiples componentes en frecuencia, esto debido a que estas señales son compuestas mediante modulación, por lo que diferentes armónicos se hacen presentes. Debido a estas componentes extras no podemos esperar obtener un espectro limpio en las frecuencias de señal continua, ya que sin duda estas componentes extras se manifestarán en la aparición de haces difractados en diferentes ángulos lo que contribuirá a ensanchar el haz.

4.5. Medición de los ángulos del haz difractado

Como primera parte de análisis se hace incidir un haz láser (He-Ne) en la ventana del bloque óptico y con la ayuda del controlador de la CAO, se genera una señal de prueba la cual se inyecta al transductor piezo-eléctrico observando así la difracción del haz. Colocamos una pantalla donde mediremos la variación del ángulo en función de la frecuencia de la onda acústica. Teóricamente podemos calcular este ángulo con la fórmula 3.2.

Ya que en el capítulo anterior se han descrito las componentes por separado, se montó un arreglo experimental para medir el ángulo del haz difractado, el cual consiste en hacer pasar un haz de luz láser a través de la CAO, fijada en una montura con 2 grados de libertad (azimut y elevación) para tener un centrado mas preciso.

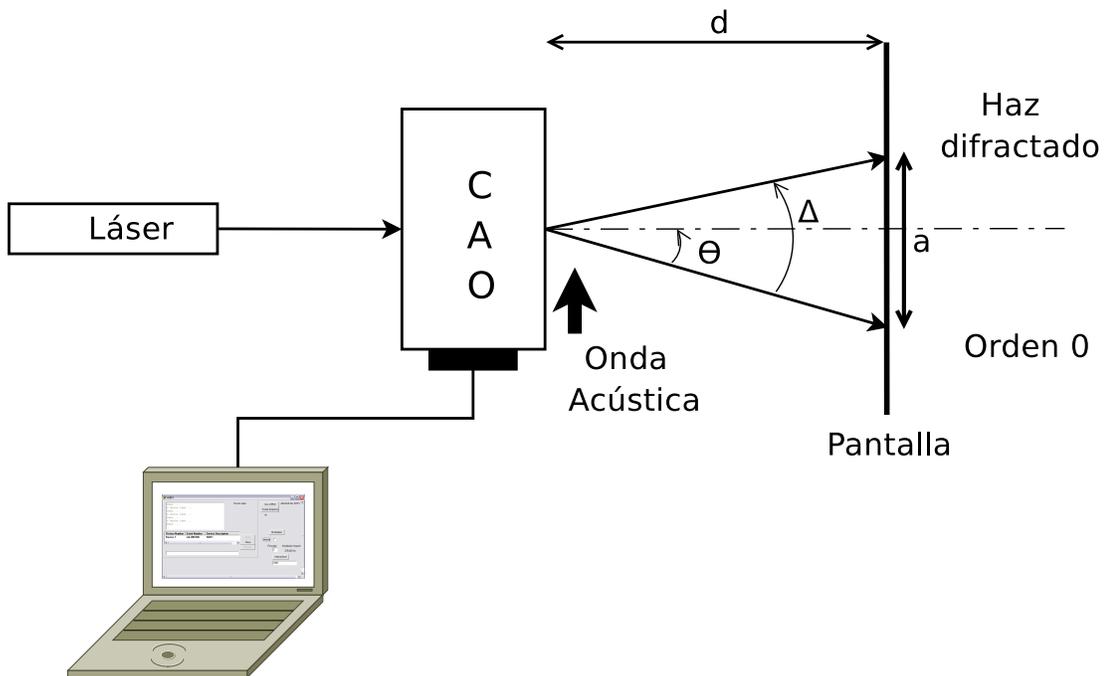


Figura 4.8: Diagrama general del montaje de la CAO para medir los ángulos de difracción para una frecuencia de onda acústica Λ

El diagrama del montaje se muestra la figura 4.8. A cierta distancia d se coloca una

pantalla con cuadrícula milimétrica sobre la cual medimos la distancia a correspondiente al haz difractado. Con trigonometría elemental se calcula el valor del ángulo de difracción para cada haz correspondiente a diferentes frecuencias de onda acústica.

Hay que hacer notar que el bloque óptico de la celda esta construida de tal forma que a la frecuencia de 70 MHz el haz atraviesa la celda aparentemente en línea recta, lo cual es de vital ayuda para alinear el sistema de enfoque y el arreglo CCD lineal en el plano óptico.

Se programó el software de control con los siguientes parámetros:

- Frecuencia inicial: 55 MHz
- Magnitud del Paso: 5 MHz
- Número de pasos: 7

El montaje armado se muestra en la figura 4.9, la mesa óptica tiene un área de 300 x 600 mm, la fuente láser es el módulo de Thorlabs HRP-120 de He-Ne, y la CAO, la cual es montada sobre una plataforma con 2 grados de libertad para hacer ajustes del ángulo de incidencia sobre la ventana óptica. Para este primer montaje en especial se colocó el arreglo CCD en el plano óptico para tomar un registro de los haces difractados mostrados en la figura 4.10.

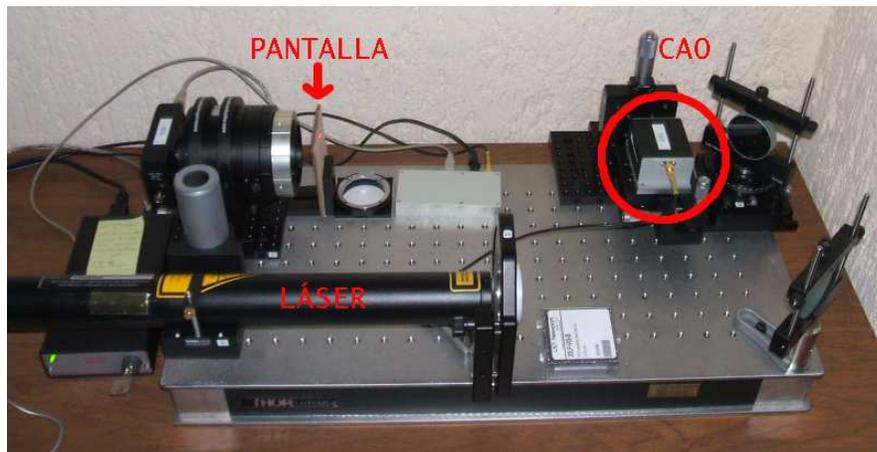


Figura 4.9: Primer montaje para medición de ángulos de difracción en función de la onda acústica.

En la figura 4.10 se muestra una imagen obtenida con el arreglo CCD lineal de la difracción del haz a las diferentes frecuencias acústicas. Los haces fueron tomados por separado con un tiempo de integración de $1\mu s$ del CCD, posteriormente fueron recortados y unidos en una sola figura.

Aquí podemos observar que el eje de las abscisas en la parte inferior maneja valores de frecuencia y las abscisas superior número de píxel, este último se refiere al número de elemento en el cual se mide la intensidad del haz en un arreglo lineal de 3000 elementos.

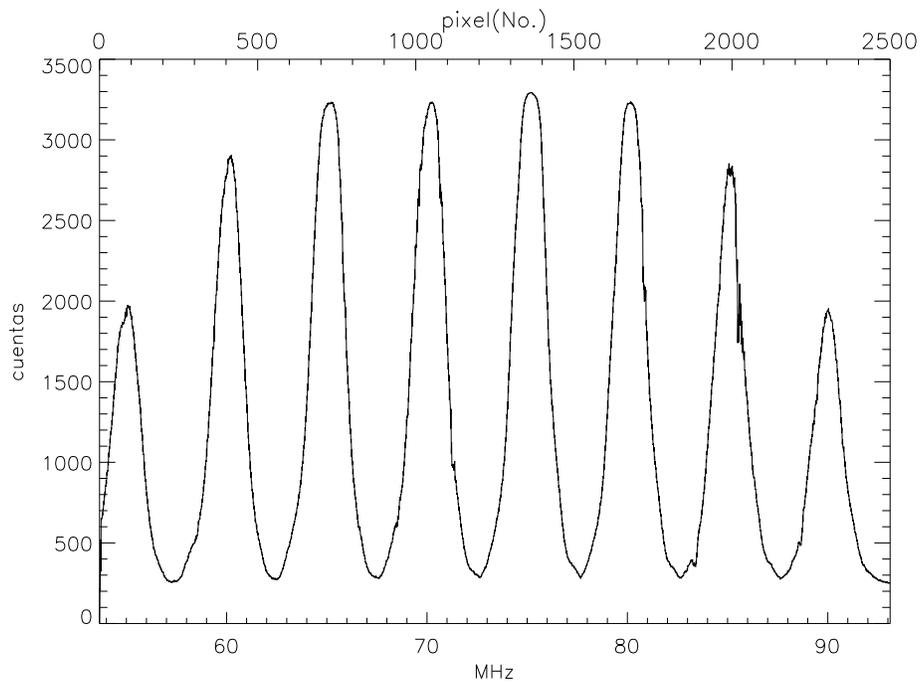


Figura 4.10: Imagen de los haces dispersos registrados en el arreglo CCD lineal con el eje superior de abscisas indicando el número de píxel del CCD y el inferior el el ajuste para la frecuencia correspondiente.

Sin embargo debido a la corta separación entre la CAO y el CCD se optó por poner la pantalla a una distancia de 1470 mm, como se muestra en la figura 4.11.

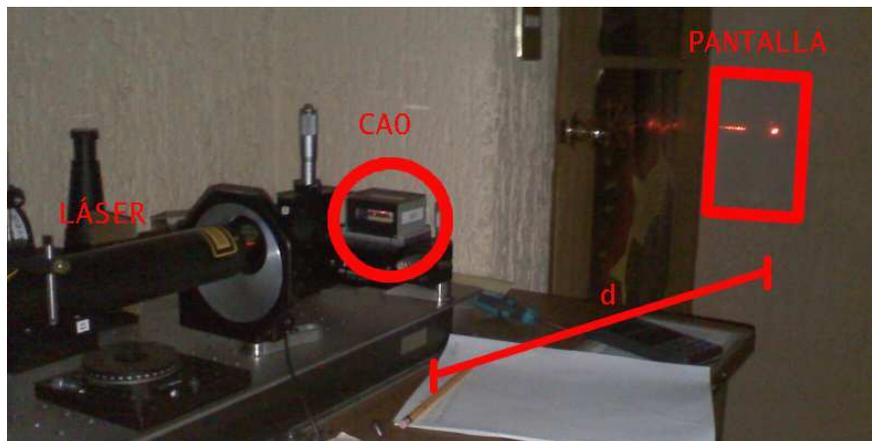


Figura 4.11: Segundo montaje para medición de ángulos donde la distancia a la pantalla d es de 1470mm

Los resultados de los ángulos medidos en función de la frecuencia de la señal se repor-

tan en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Ángulos de difracción medidos con el segundo montaje

Frecuencia(MHz)	Distancia a (mm)	Δ teórico($^{\circ}$)	Δ observados($^{\circ}$)
55	79	3.07	3.08 ± 0.041
60	86	3.34	3.35 ± 0.041
65	93	3.62	3.62 ± 0.041
70	101	3.90	3.93 ± 0.041
75	107	4.18	4.16 ± 0.041
80	114	4.45	4.43 ± 0.041
85	122	4.73	4.74 ± 0.042
90	128	5.01	4.98 ± 0.042

La precisión del ángulo medido en realidad es respecto a la distancia a medida en la pantalla, ya que el ángulo se calcula mediante la función arcotangente de estas distancias.

Para encontrar la relación que existe entre el ángulo del haz difractado y la frecuencia de la onda acústica se hizo un ajuste gaussiano a cada haz por separado para localizar el máximo de cada haz, posteriormente se analizó que el ajuste óptimo era de tipo lineal, por lo que se encontró que la resolución espectral por cada 2 pixeles era de 64 KHz.

En la figura 4.12, se muestran los haces por separado con su respectivo ajuste gaussiano y para cada haz se mide el FWHM resultado del ajuste. Estos ajustes dan un ancho promedio de $768.8 \pm 32.9 \mu\text{m}$. La relación que existe entre la localización de los máximos y la frecuencia de la onda acústica se muestra en la figura 4.13.

4.6. Pruebas y mediciones del módulo de enfoque

Es sabido que un sistema de lentes se puede modelar como una lente gruesa. Un sistema como este está caracterizado por sus puntos cardinales, estos son: el los puntos focales primario y secundario, los puntos principales primario y secundario y los puntos nodales primario y secundario siendo en total seis.

Para fines del espacio requerido en la mesa óptica la distancia que es crucial conocer es la longitud focal posterior (lfp), que se mide sobre el eje óptico del sistema desde el vértice hasta el punto focal secundario [7].

Utilizando el arreglo experimental montado para medir esta longitud, ya que se estará enfocando un haz colimado, también medimos el tamaño de la mancha que se forma en ese punto, para esto colocamos el arreglo lineal CCD donde registramos el perfil de esta mancha. Es decir que en un mismo arreglo experimental se pueden hacer las dos medidas necesarias para evaluar los alcances de este módulo para el desempeño total de la versión de laboratorio del espectrómetro.

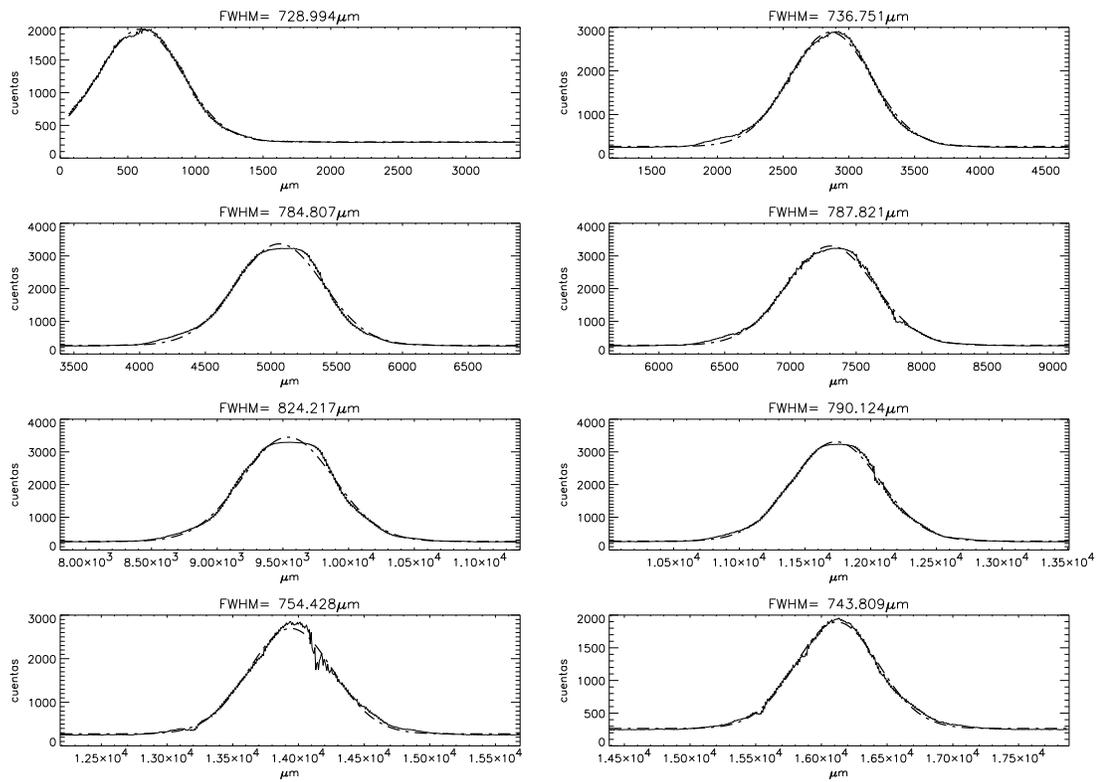


Figura 4.12: Ajuste gaussiano de cada haz difractado en el barrido de 55 a 90 MHz, en la parte superior de cada gráfica esta la medida del ancho a altura media (FWHM).

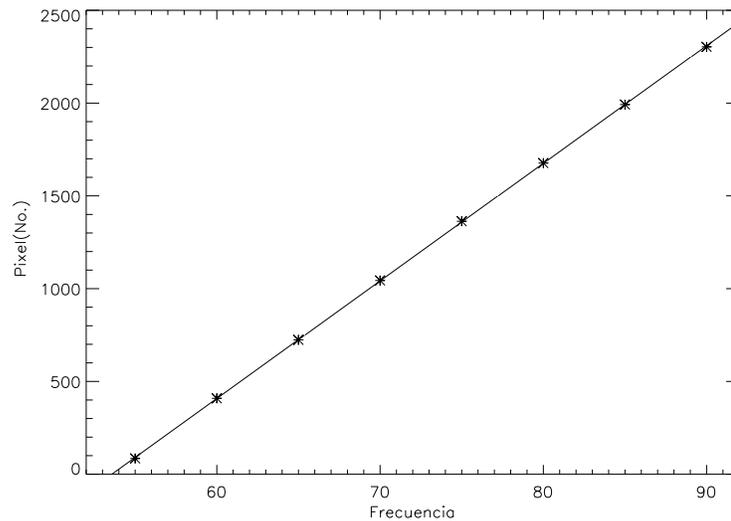


Figura 4.13: Relación de la localización de los máximos respecto a la frecuencia. La relación lineal de la forma: $y = mx + b$

4.6.1. Montaje experimental para la medición de la lfp y el tamaño de mancha en el plano focal del sistema de lentes de enfoque

Para realizar esta medición se utilizó un haz expandido y colimado de luz láser con el que se cuenta en el Taller de óptica. El módulo de enfoque se colocó frente a este haz cuidando que estuviera perpendicular respecto a la dirección de los rayos del haz. El arreglo CCD lineal fué colocado en el plano focal del sistema de lentes, tomando registros del tamaño de la mancha. El esquema para esta medición se muestra en la figura 4.14.

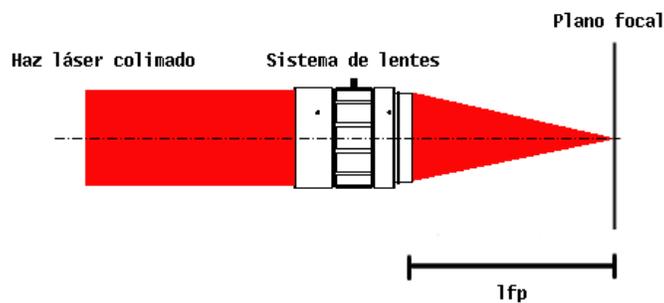


Figura 4.14: Experimento montado para medir la longitud focal posterior del sistema de lentes de Edmund. El arreglo CCD lineal se colocó en el plano focal para medir el tamaño de la mancha en ese punto.

A pesar de tener cierta simetría para este montaje debido a que el haz colimado tiene una forma circular, la alineación con el eje óptico es primordial. El haz colimado, el sistema de lentes y el CCD deben de mantenerse en la misma línea. En el caso del CCD se puede tener cierto margen de error ya que el plano donde se colca es perpendicular al eje óptico y el largo del pixel es bastante mayor que el ancho (~ 30 veces), pero no se puede descuidar que este no sea perpendicular ya que estaríamos registrando una imágen con cierto ángulo que equivaldría a tener sección mayor de lo que en realidad es.

Medición de la longitud focal posterior (lfp) del sistema de lentes de enfoque

Para este montaje, mantener en el eje óptico al módulo de enfoque y al CCD fué una tarea laboriosa. Para ir monitoreando la alineación se usó el arreglo CCD lineal (descrito en la sección 3.8, el cual mostraba el tamaño de la mancha mediante el software de despliegue de datos, con esto se hacían los ajustes hasta encontrar el perfil de la mancha más angosto. Sin embargo el enfoque del haz tal y como lo entregaba el sistema de colimación hacía que se saturaran los pixeles, provocando el desbordamiento. Para

controlarse la potencia del haz se utiliza un polarizador.

En la figura 4.15 se muestra el montaje experimental, con el que se midió esta distancia y el tamaño de la mancha, la longitud de onda del láser es de 632.8 nm. La lfp medida fue de $81 \pm 0.5\text{mm}$.



Figura 4.15: Montaje experimental hecho en el laboratorio del taller de óptica del INAOE. El haz colimado procede de la parte izquierda en la imagen.

Tamaño de mancha en el plano focal

El perfil de la mancha en el plano focal fue medido con el montaje ya armado para la medición de la lfp y el método para medirla se describe a continuación.

Una vez que se tomaba una imagen del perfil del haz, se movía el CCD en la dirección paralela a la propagación para ir observando si este se ensanchaba o se reducía, una vez observada la mancha más angosta se tomó la medida de la lfp y se registró la imagen. El perfil más angosto de la mancha es el que vemos en la figura 4.16, a este se le hizo un ajuste a una función gaussiana, el cual se presenta con la línea punteada, de donde encontramos tener un FWHM de $23.4\mu\text{m}$.

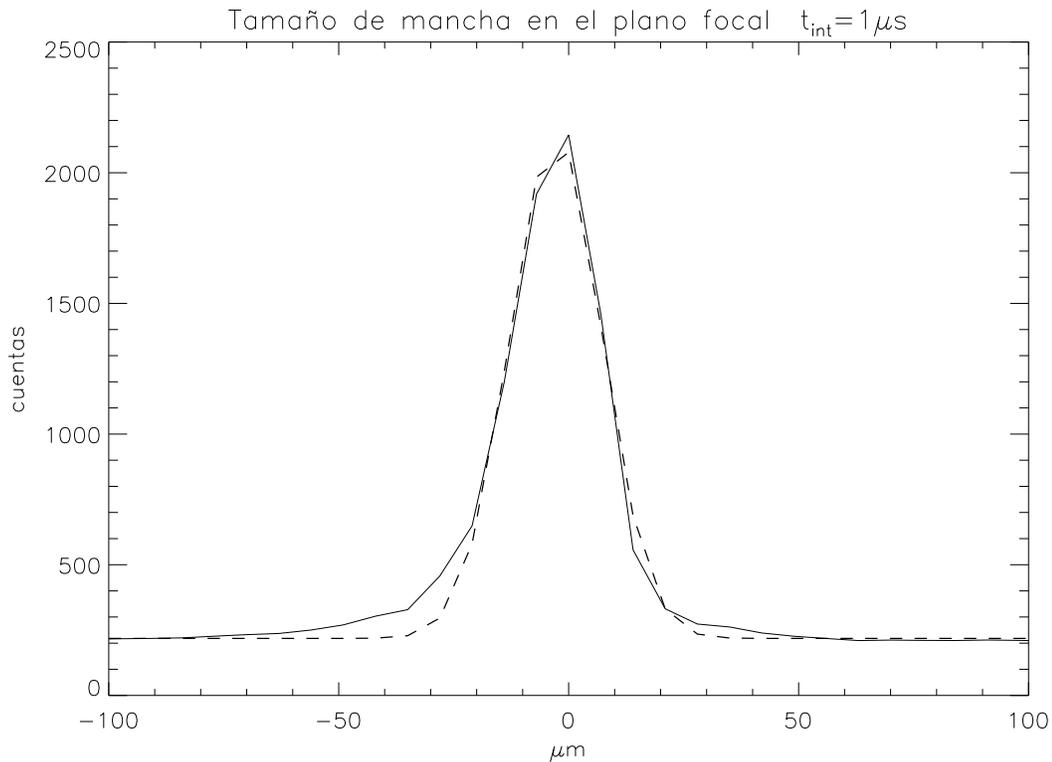


Figura 4.16: Tamaño de la mancha en el plano focal del sistema de lentes de enfoque. La línea punteada es el ajuste a una función gaussiana para medir el FWHM.

4.7. Espectro sintético

Como lo mencionamos en la sección 4.1, la forma en la que analizaremos el desempeño de nuestra versión de laboratorio es comparando el espectro de potencias obtenido utilizando un analizador de espectro de uso común (figura 4.7), contra el espectro obtenido mediante el EAO. El objetivo es analizar la forma de este, la linealidad de la difracción de los haces en función de la frecuencia acústica, la resolución y el ancho de banda. En la sección 3.10 se mostró el diagrama general del montaje de laboratorio del espectrómetro (figura 3.16). La integración de las componentes con el espacio disponible ha sido suficiente para la obtención de los primeros resultados. En la figura 4.17 vemos el montaje final.

En el montaje que se armó para las mediciones de la sección 4.5 ya se involucraban prácticamente todos los módulos, con excepción del módulo de enfoque (ver figura 4.9). Con la integración del módulo de enfoque se completa esta versión de laboratorio, las medidas de la lpf nos indican donde colocar el CCD. La distancia a la que se coloca el sistema de lentes de enfoque, respecto a la CAO, es la distancia de trabajo que marca el fabricante.

La linealidad del ángulo de refracción respecto a la frecuencia de la señal acústica

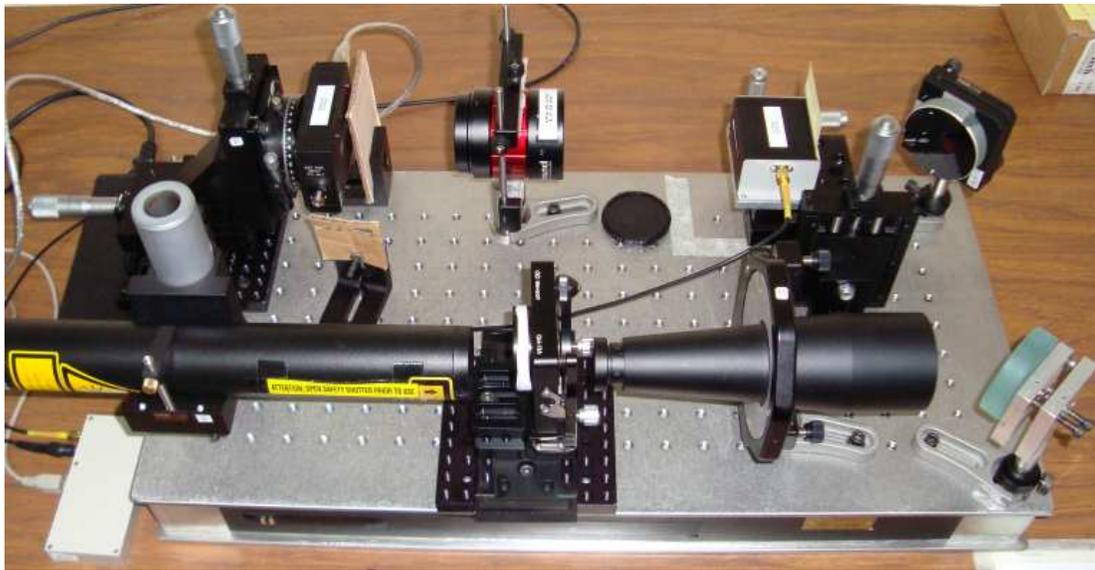


Figura 4.17: Montaje de la versión de laboratorio del espectrómetro acusto-óptico.

que observamos en el gráfico de la figura 4.13, es algo que no se desea modificar al introducir el sistema de lentes de enfoque, ya que el tener que corregir esto implica someter los datos a un procesamiento extra lo que puede crear errores en la información final.

Hay que hacer la distinción entre la distancia focal y la l_{fp} , la primera se mide desde el plano principal secundario del sistema de lentes al punto focal posterior, en este caso el plano principal secundario queda dentro del sistema de lentes. La segunda hace referencia a la distancia medida desde el vértice al punto focal posterior.

Para el diseño del espectrómetro esta distancia focal de nuestro módulo de enfoque es función del rango de difracción angular y la resolución de la CAO además del teorema de muestreo de Nyquist. La expresión que nos relaciona estos parámetros es la siguiente [5]:

$$f\theta = l, \quad (4.1)$$

donde f es la distancia focal del sistema de enfoque, θ el rango de difracción angular en radianes y l la longitud de exploración.

Con la expresión 2.15 podemos calcular el número de manchas, es decir el número de elementos angulares que podemos resolver con la CAO, siendo estos ~ 2460 . Ahora usando el teorema de Nyquist podemos ver que necesitamos al menos el doble de elementos para poder registrar todos esos ángulos.

Si nuestro arreglo lineal CCD tiene 3000 elementos de $7 \times 200\mu m$ cada uno, sustituyendo en la expresión 4.1 la longitud focal de 120 mm y el rango de difracción angular de 2.25° obtenemos una distancia de 4.7 mm, por lo que en número de pixeles del CCD donde estaremos registrando el espectro solo es de ~ 673 elementos. Este cálculo se

hace para conocer la longitud de exploración de nuestro arreglo lineal de CCD que se está ocupando.

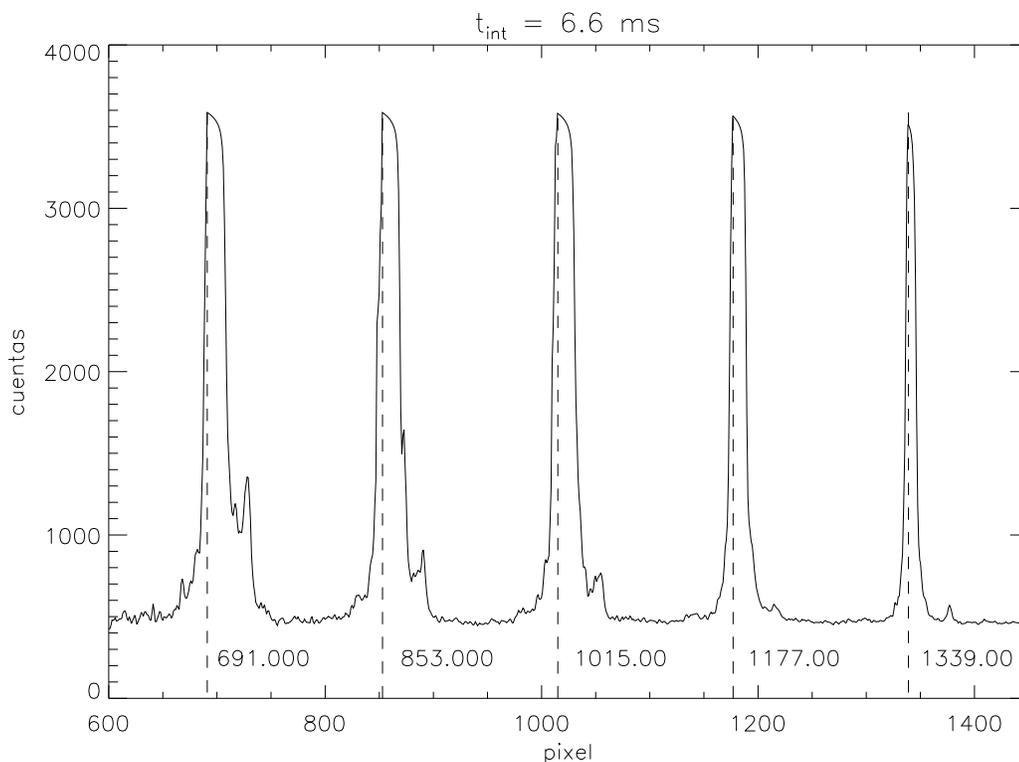


Figura 4.18: Imagen obtenida con el espectrómetro del barrido de señales de 50 a 90 MHz con pasos de 10 MHz donde se aprecia que la linealidad del ángulo de difracción en función de la frecuencia se conserva. La línea punteada y el valor que aparece a su derecha es la ubicación del máximo y el número de pixel donde está, como vemos la diferencia es la misma en todos los casos.

En la figura 4.18 se muestra la imagen generada por el espectrómetro. La señal generada con el controlador de la CAO (sección 3.4.4) es un barrido de señal que va desde 50 hasta 90 MHz pasos de 10 MHz de ancho. El tiempo de integración del CCD se ajustó para que en una sola imagen se imprimieran las componentes espectrales de las 5 diferentes frecuencias. La forma que tienen nuestra señal de barrido se detalló en la sección 4.4.

Con los datos obtenidos de esta imagen podemos ver que la linealidad del ángulo de difracción respecto a la frecuencia de la señal se sigue conservando ya que el espacio entre los máximos es constante. Nuestro espectro generado nos muestra claramente las componentes de 50, 60, 70, 80 y 90 MHz. El elevado tiempo de integración provoca una saturación en los píxeles, por lo que vemos una súbitas caídas de la intensidad conforme se acercan al desbordamiento.

Otro aspecto que se puede apreciar en la figura 4.18 es que los haces se ven más anchos

del lado derecho, esto en parte es provocado por no tener el plano de fotodetección exactamente paralelo al plano focal del módulo de enfoque. Al tener cierto ángulo de inclinación del plano del CCD respecto al plano focal, podemos apreciar como la forma de nuestros haces cambia, sin embargo la ubicación de los máximos sigue siendo proporcional, es decir se conserva la linealidad de la separación entre ellos (ver figura 4.19)z. Estos son aspectos que se puede mejorar teniendo una sola pieza sobre la cual esten montados y alineados tanto el módulo de enfoque como el CCD.

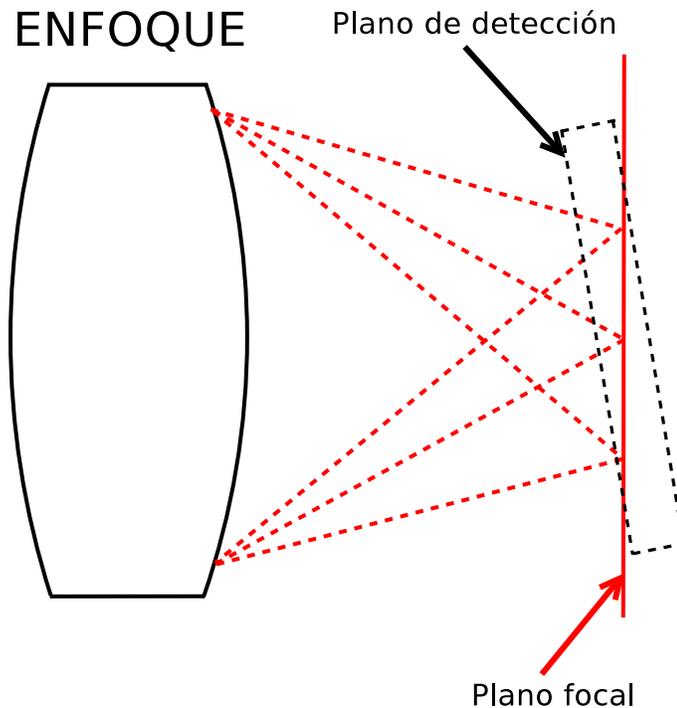


Figura 4.19: La posición del plano de detección, es decir el plano donde colocamos el CCD, respecto al plano focal es la causa del ensanchamiento en una dirección de los haces. Sin embargo este ángulo es de apenas unos grados.

Con estos datos podemos calcular tanto la resolución espectral como el ancho de banda, estos son: 45 KHz y 15.1 MHz respectivamente.

Capítulo 5

Conclusiones

Los espectrómetros acusto-ópticos están bien posicionados como una alternativa económica, sencilla y con proyecciones a futuro desarrollo. La inclusión de este tipo de espectrómetros en proyectos espaciales, como SWAS y Herschel, lo hacen muy factible en lo que se refiere al consumo de potencia y al ahorro de espacio.

En esta primer etapa de la construcción del espectrómetro hemos encontrado que es factible el desarrollo dentro del instituto ya que no se necesita la construcción de ningún inmueble extra para realizar las pruebas de componentes ni el armado completo del instrumento. No se ha requerido de hacer construcciones especiales y bajo circunstancias especiales para poder desarrollar los resultados aquí presentados.

El uso de un láser del tipo He-Ne, ha sido muy útil para fines experimentales, pero debido a sus dimensiones y al cuidado que se debe tener en su manipulación es poco probable que resista en buen estado en las condiciones de trabajo, es por eso que se hace necesario el uso de un láser de diodo cuyas dimensiones comunes son mucho menores. La expansión y colimación tienen un papel fundamental respecto al tamaño de la mancha que podemos obtener en el plano focal de nuestro modulo de enfoque. El ensanchamiento de la mancha está relacionado directamente con estos 2 factores. Este mismo tema se ha abordado en los trabajos [27], [25], [26], [24] donde se ha analizado de una manera formal el caso de construirse con prismas, en lugar de lentes.

Las señales de FI que se generan mediante el controlador de la CAO han sido suficientes en esta etapa, sin embargo se necesita un generador en el que se puedan manipular de forma diferente los parámetros de la FI para futuras pruebas.

Debido a que el ángulo de barrido del haz difractado de la CAO es de $\sim 2.2^\circ$ la distancia que se mide en el plano focal del sistema de enfoque es de ~ 5 mm, y la resolución espectral se ve severamente afectada ya que solo estamos usando 25 % de los píxeles del arreglo lineal de CCD.

La potencia del láser (12 mW) fué controlada mediante el uso de un polarizador, sin embargo está sobrada, ya que los tiempos de integración que se estuvieron manejando fueron del orden de μs , al incrementar este tiempo por 2 órdenes de magnitud se notaba saturación en el CCD, por lo que tener un control electrónico de la potencia es necesario para no seguir utilizando medios ópticos que ocupen más espacio en nuestra mésa

óptica, además de tener que alinearlos y cuidar que no modifiquen la forma del haz láser.

El módulo de enfoque nos presentó muy buenas ventajas en cuanto al espacio que ocupa en nuestra mesa óptica, ya que la longitud focal posterior es $\sim 80\text{mm}$. Sin embargo sólo se está ocupando el 21 % de la longitud de detección del CCD, esto en debido al rango de difracción angular y a la distancia focal de nuestro sistema de lentes. Esto afecta directamente con pérdida de resolución espectral (incrementándola en un factor de casi 3 veces) y una reducción del ancho de banda a un 62 % de lo que se esperaba dadas las características de nuestra CAO.

Lo anterior nos lleva a tener que acoplar la longitud de nuestro detector CCD con un sistema de lentes de enfoque que además de proporcionarnos un tamaño de mancha focal muy pequeño tenga una longitud focal posterior que se adecúe al espacio disponible, ya que si queremos aprovechar el potencial de nuestra CAO en cuanto a resolución espectral es necesario al menos hacer un cambio ya sea en el módulo de enfoque o en el CCD.

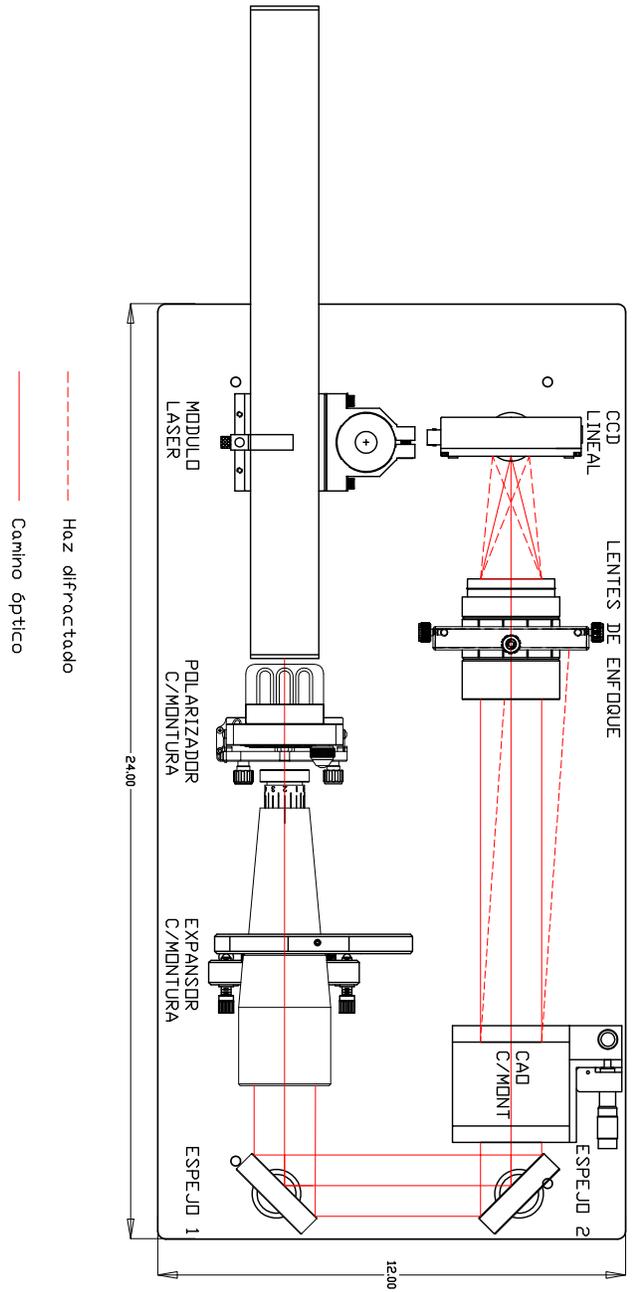
El diseño de otro sistema de enfoque que nos permita ocupar al menos un 80 % de la longitud del CCD, implicaría por un lado que la expansión haz no sea a los 40mm, debido a que no es necesaria tener una alta resolución ya que nuestro CCD no la podría resolver, por lo que con solo iluminar tan solo la mitad de la ventana óptica se puede obtener una resolución de 34KHz. Por otro lado la distancia focal requerida puede ser de 400mm lo cual queda dentro del espacio de nuestra mesa óptica.

La optimización de la resolución espectral del espectrómetro depende no solamente del tamaño y material de la CAO, factores como el tamaño de la mancha en el plano focal y la longitud focal posterior del sistema de lentes de enfoque, el número y tamaño de pixel son muy importantes para lograr un buen resultado.

Apéndice A

Esquemas de componentes mecánicas

Esquema general Espectrómetro Acusto-óptico



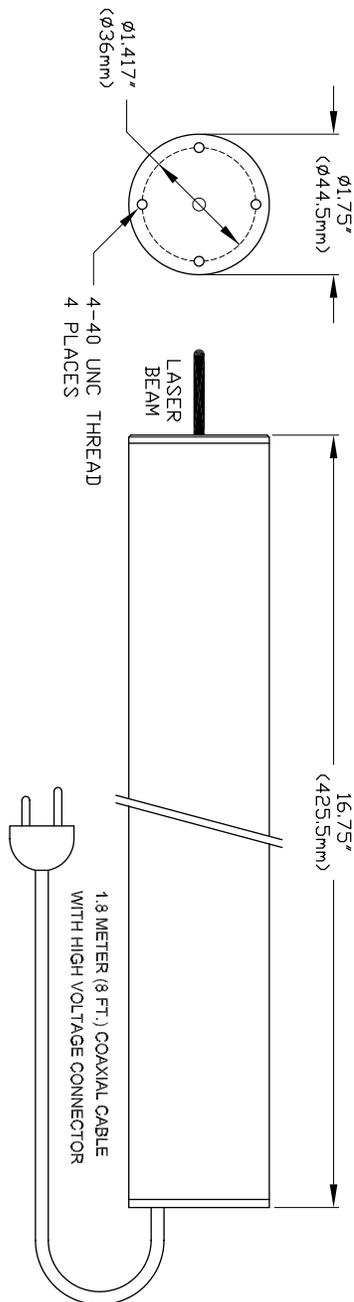
INSTITUTO NACIONAL DE ASTROFISICA, ÓPTICA Y ELECTRÓNICA			
Departamento	Astrofísica	Proyecto	Espectrómetro Acusto-Óptico
Director	Abraham Luna		Espectrómetro Acusto-Óptico Montaje de laboratorio
Operador	Guillermo Herrera		
Operador	pulg.	Fecha aaaa-mm-dd	

Figura A.1: Esquema del montaje completo de la versión del laboratorio

COPYRIGHT © 2004 by THORLABS INC.

HRP120

HeNe LASER SYSTEM, 633nm, 120mW, POLARIZED



INFORMATION ONLY, NOT FOR MANUFACTURING.

THORLABS PT. BOX 366 NEWTON, NJ			
TITLE HRP120 - HeNe LASER SYSTEM			
TEL: XXXXX-7-0005 XXXXX-0000 ANGLE/AR V-7-30			
SPEC: FINISH 32 MICROINCHES UNLESS OTHERWISE NOTED			
SYMBOL HS		TOLERANCE TC	
MATERIAL N/A			
DATE 08/30/04	REV A	ISSUE 1 of 1	ISSUANCE NONE
DWG. NO. 12108-ECO1	PART NO. HRP120		

Figura A.3: Esquema Módulo Láser HRP120

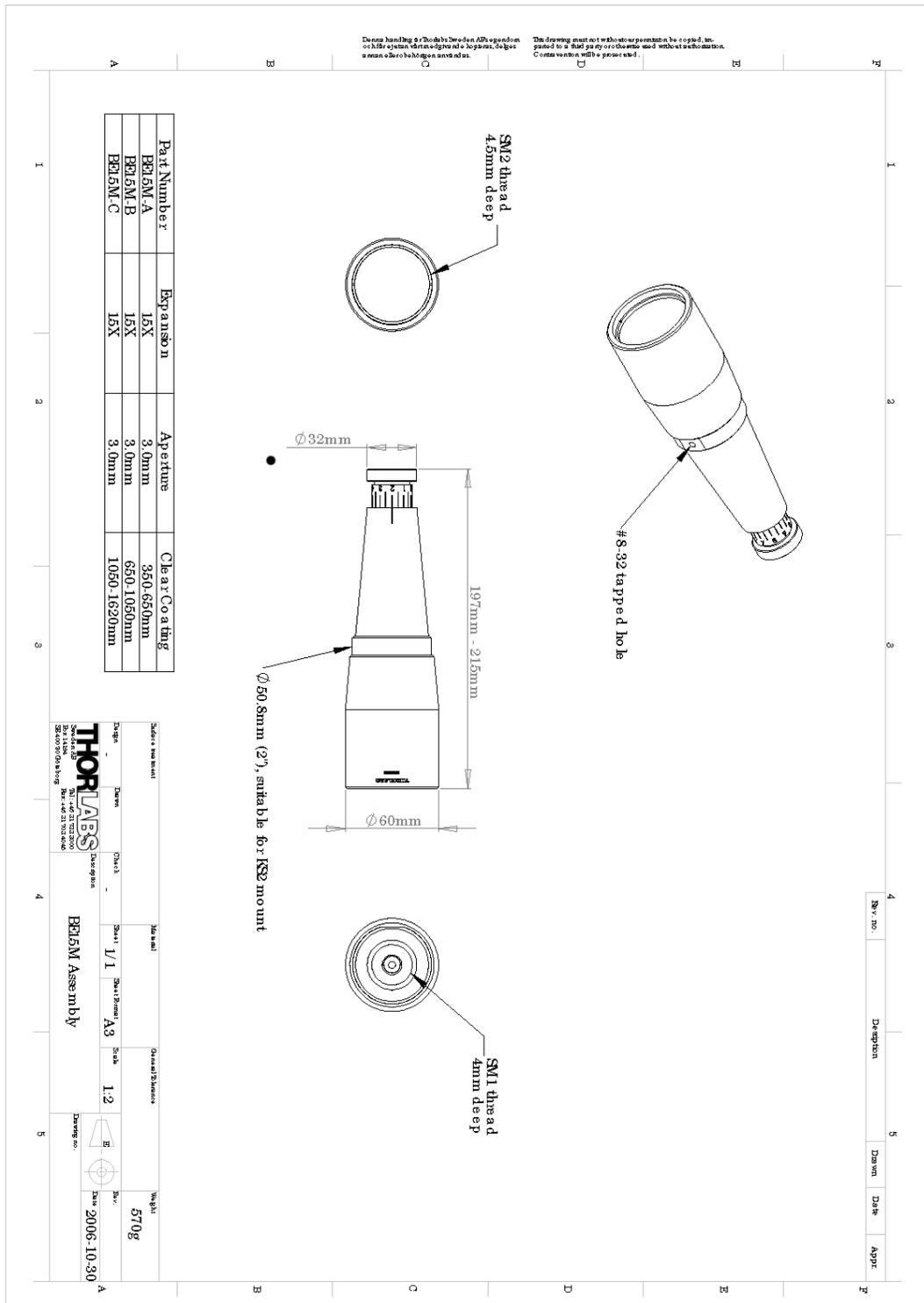


Figura A.4: Esquema expansor de haz BE15M

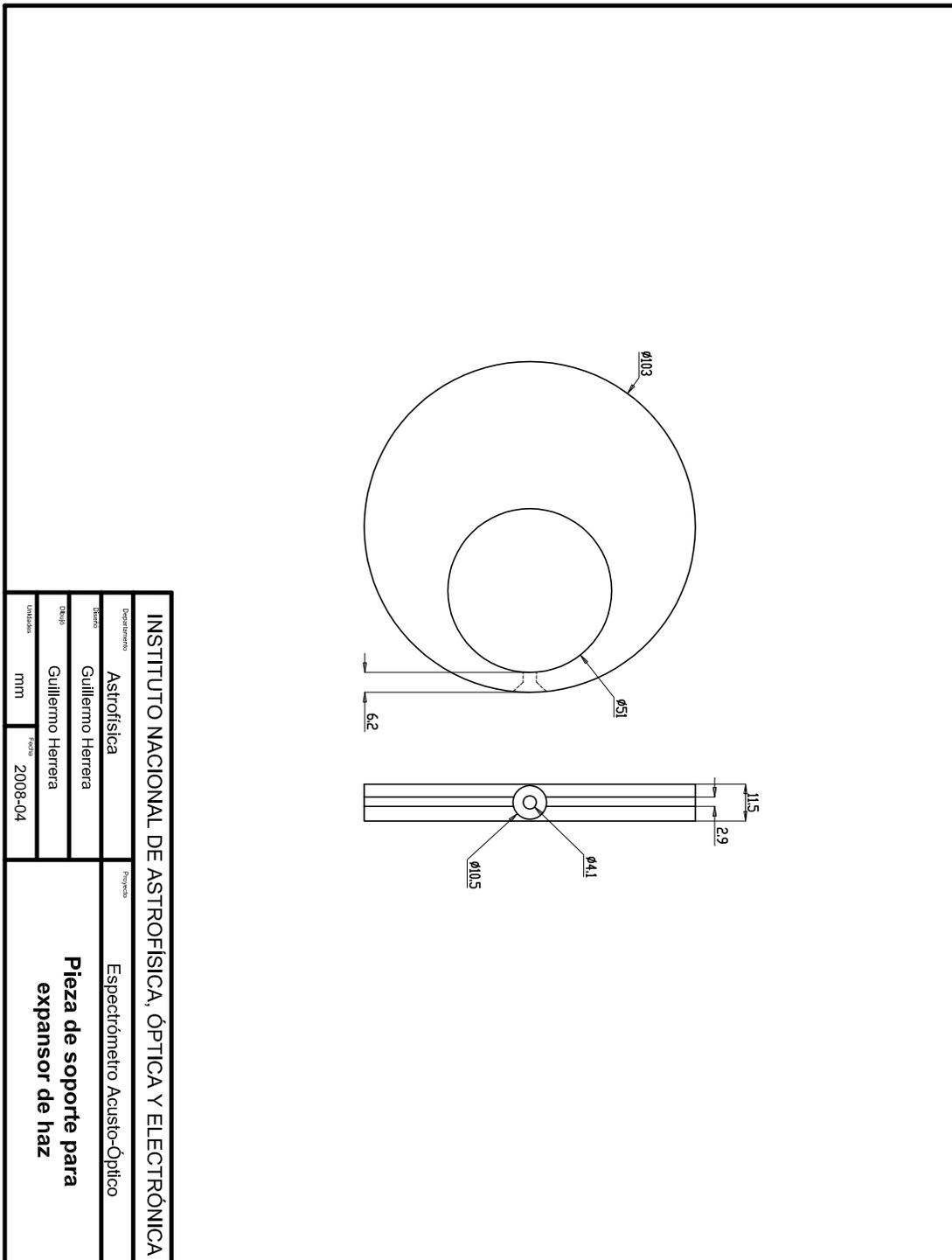
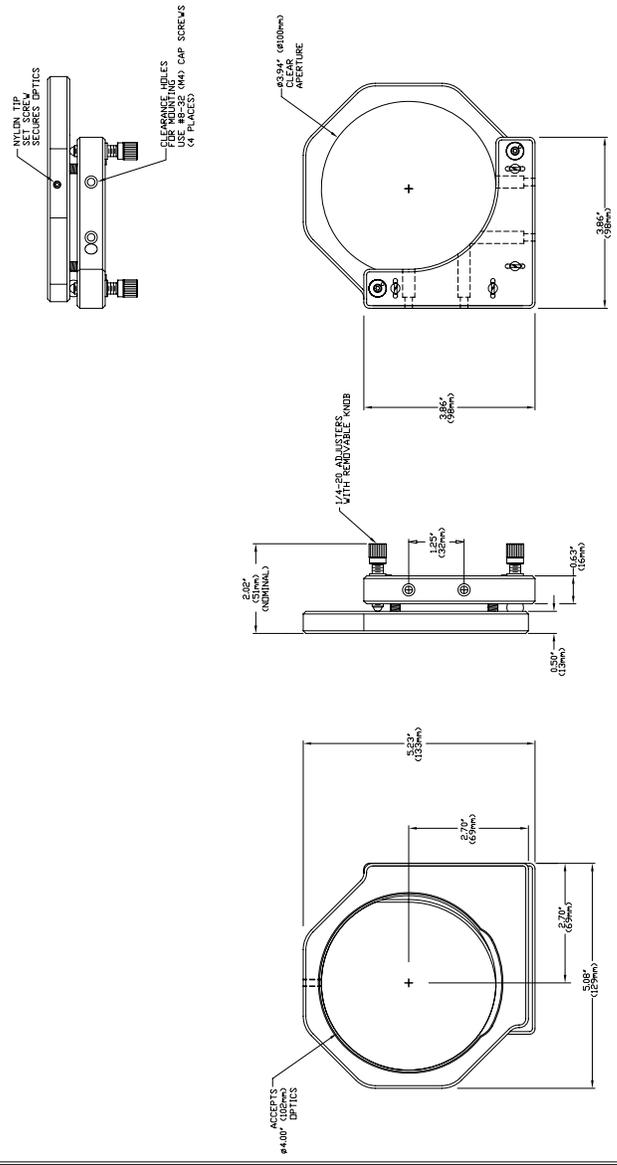


Figura A.5: Pieza auxiliar para el soporte del expansor en la montura KS4

COPYRIGHT © 1999 by THORLABS INC.



THORLABS		PO BOX 366 NEWTON NJ	
TITLE KINEMATIC 4" MIRROR MOUNT			
TOL: XXXX+/-0.05 XXX+/-0.012 ANGLUAR +/-30'		WHERE USED	
BRAWN	N/A	APPROVED	ENGINEERING
DAH	AC	REV	SIZE AC
DATE	09	SHEET	SUPPORT
PLG	AB	1	OF 1
PAGE	1	PART	KS4
1885-E01		KS4	

INFORMATION ONLY, NOT FOR MANUFACTURING.

Figura A.6: Esquema montura de expensor de haz KS4

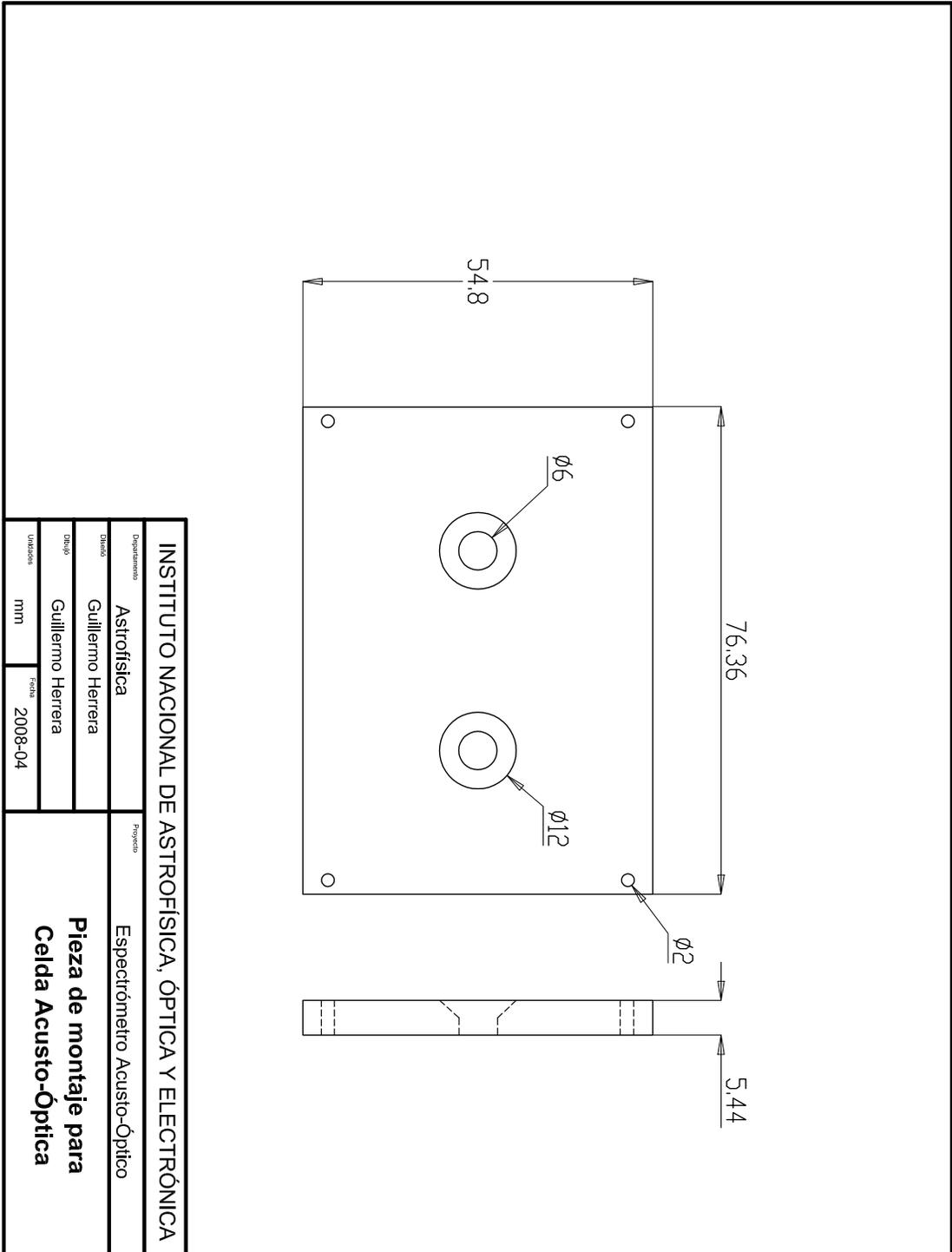


Figura A.7: Placa de fijado para el bloque óptico de la CAO

Índice de figuras

1.1. Estructura de un radiotelescopio	4
2.1. Dispersión en el regimen de Raman-Nath y Bragg	9
2.2. Intensidad de los ordenes de difracción en el regimen de Raman-Nath y Bragg	9
2.3. Difracción en un medio anisotrópico descrita mediante los vectores de onda del haz incidente k_i , el haz difractado k_d y la onda acústica K , con $\theta_i \neq \theta_d$	11
2.4. Gráfica de los ángulos incidente y refractado en función de la frecuencia de la onda acústica	12
3.1. Alcances teóricos del espectrómetro acusto-óptico a 43 GHz. La línea segmentada indica el ancho de banda y la resolución teóricos del instrumento. Las barras sobre los diferentes objetos nos indican el rango de resolución y el ancho de banda con los que se han observado reportados en la literatura.	16
3.2. Diagrama modular del espectrómetro acusto-óptico	18
3.3. CAO conectada y funcionando con su software.	20
3.4. Controlador de la CAO	20
3.5. Interfaz gráfica del software de control AOD1 . Mediante este podemos enviar señales de RF de FI hacia el transductor piezo-eléctrico	23
3.6. Pestaña de control de parámetros. Una vez conectada y detectado el cristal puede uno ajustar los parámetros de la señal que se genera mediante la modulación interna.	23
3.7. Láser He-Ne HRP-120	25
3.8. Expansor de Haz de Thorlabs con su montura y la pieza fabricada en el taller mecánico del INAOE	26
3.9. Sistema de lentes de enfoque Edmund con su montura y acoplado a una cámara CCD	28
3.10. Arreglo lineal de CCD LC1-USB de Thorlabs	29

3.11. Interfaz gráfica del software spectra , con el cual se puede manipular el tiempo de integración, además de poder descargar los datos a una computadora. El eje de las abscisas nos indica el número de pixel y el de las ordenadass el número de cuentas	30
3.12. Pieza para ajuste de montura de expansor de haz construida en el taller mecánico de INAOE.	31
3.13. Orificios de sujeción del bloque óptico de la CAO.	32
3.14. Diagrama de colocación de los 2 espejos que son utilizados para cambiar la dirección del haz expandido. El ángulo α es de 45° para garantizar la ortogonalidad.	33
3.15. Imagen de espejos de 60 mm de diámetro fabricado en el taller de óptica del INAOE.	33
3.16. Diagrama general del espectrómetro acusto-óptico con las componentes actuales. Las líneas rojas indican el camino óptico, la línea punteada indica el haz deflectado.	34
4.1. Esquema del montaje para la obtención del patrón de difracción de una rendija circular de $25\mu\text{m}$ de diámetro capturado con el arreglo lineal de CCD de Thorlabs.	36
4.2. Patrón difracción de rendija circular	37
4.3. Perfil tomado con la arreglo CCD lineal. El ajuste gaussiano es la línea segmentada.	38
4.4. Medición de la estabilización de la potencia	39
4.5. Haz láser expandido con lentes y registrado en el arreglo CCD lineal, la línea sólida es un ajuste realizado con la ayuda del software <i>spectra</i> (ver sección 4.2.2).	40
4.6. Señal modulada inyectada, mediante el uso del controlador, al transductor piezo-eléctrico. El periodo T se modifica mediante la variación del parámetro “PRESCALER” en el software de control de la CAO. Como se puede ver el tiempo de pulso es T/2, el resto no se inyecta señal alguna hasta iniciar de nuevo el periodo, donde la señal generada es la frecuencia inicial más el paso programado (Frequency start + Step frequency).	41
4.7. Espectro de potencia del barrido en frecuencia desde 55 hasta 90MHz con pasos de 5MHz tomados con una analizador de espectro.	41
4.8. Diagrama general del montaje de la CAO para medir los ángulos de difracción para una frecuencia de onda acústica Λ	42
4.9. Primer montaje para medición de ángulos de difracción en función de la onda acústica.	43
4.10. Imagen de los haces dispersos registrados en el arreglo CCD lineal con el eje superior de abscisas indicando el número de píxel del CCD y el inferior el el ajuste para la frecuencia correspondiente.	44

4.11. Segundo montaje para medición de ángulos donde la distancia a la pantalla d es de 1470mm	44
4.12. Ajuste gaussiano de cada haz difractado en el barrido de 55 a 90 MHz, en la parte superior de cada gráfica esta la medida del ancho a altura media (FWHM).	46
4.13. Relación de la localización de los máximos respecto a la frecuencia. La relación lineal de la forma: $y = mx + b$	46
4.14. Experimento montado para medir la longitud focal posterior del sistema del lentes de Edmund. El arreglo CCD lineal se colocó en el plano focal para medir el tamaño de la mancha en ese punto.	47
4.15. Montaje experimental hecho en el laboratorio del taller de óptica del INAOE. El haz colimando procede de la parte izquierda en la imagen.	48
4.16. Tamaño de la mancha en el plano focal del sistema de lentes de enfoque. La línea punteada es el ajuste a una función gaussiana para medir el FWHM.	49
4.17. Montaje de la versión de laboratorio del espectrómetro acusto-óptico.	50
4.18. Imagen obtenida con el espectrómetro del barrido de señales de 50 a 90 MHz con pasos de 10 MHz donde se aprecia que la linealidad del ángulo de difracción en función de la frecuencia se conserva. La línea punteada y el valor que aparece a su derecha es la ubicación del máximo y el número de pixel donde está, como vemos la diferencia es la misma en todos los casos.	51
4.19. La posición del plano de detección, es decir el plano donde colocamos el CCD, respecto al plano focal es la causa del ensanchamiento en una dirección de los haces. Sin embargo este ángulo es de apenas unos grados.	52
A.1. Esquema del montaje completo de la versión del laboratorio	56
A.2. Esquema Mesa óptica	57
A.3. Esquema Módulo Láser HRP120	58
A.4. Esquema expansor de haz BE15M	59
A.5. Pieza auxiliar para el soporte del expansor en la montura KS4	60
A.6. Esquema montura de expansor de haz KS4	61
A.7. Placa de fijado para el bloque óptico de la CAO	62
A.8. Esquema Arreglo CCD lineal LC1-USB	63

Índice de Tablas

4.1. Comparación de los valores teóricos con los medidos del patrón de difracción.	37
4.2. Ángulos de difracción medidos con el segundo montaje	45

Bibliografía

- [1] Brillouin, L. 1922, *Annual de Physique*, 17, 88
- [2] Cole, T. W., & Milne, D. K. 1977, *Proceedings of the Astronomical Society of Australia*, 3, 108
- [3] Debye, P., & Sears, F. W. 1932, *Proceedings of the National Academy of Science*, 18, 409
- [4] Dixon, R. W. 1967, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 85
- [5] Gal, C. 2005, PhD thesis, Universidad de Colonia, Alemania
- [6] Harris, A. I. 2002, in *Far-IR, Sub-mm & mm Detector Technology Workshop*, ed. W. J., J. Farhoomand, & C. R. McCreight
- [7] Hecht, E. 2002, *Optics 4th Edition* (Addison-Wesley)
- [8] Irvine, W. M., Carrasco, E., & Aretxaga, I. 2005, *The Large Millimeter Telescope (INAOE and UMASS)*
- [9] Kaifu, N., Ukita, N., Chikada, Y., & Miyaji, T. 1977, *PASJ*, 29, 429
- [10] Klein, W. R., & Cook, B. D. 1967, *Sonics and Ultrasonics*, *IEEE Transactions on*, 14, 123
- [11] Klumb, M., Frerick, J., Tolls, V., Schieder, R., & Winnewisser, G. F. 1994, in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Vol. 2268, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, ed. M. S. Scholl, 305–315
- [12] Korpel, A., Alder, R., & Desmares, P. 1965, *IEEE J. Quantum Electronics.*, 60
- [13] Lambert, L. B. 1962, *1962 IRE National Convention.*, 69
- [14] Lucas, R., & Biquard, P. 1932, *J. Phys. Radium*, 3, 464
- [15] McIntosh, G. C., & Rislow, B. 2009, *ApJ*, 692, 154
- [16] Molecular Technology, GmbH. 2008, Website, <http://www.mt-berlin.com/>

- [17] Newport corporation. 2009, Website, <http://search.newport.com/?sku=M-36>
- [18] Phariseau, P. 1956, Proceedings of the Indian Academy of Sciences, 165
- [19] Radiotelescopio de 5 metros. 2007, Website, <http://www.inaoep.mx/~rt5/>
- [20] Raman, C. V., & Nath, N. S.Ñ. 1935-1936, Proceedings of the Indian Academy of Sciences
- [21] Scalise, E. 1999, in Astrophysics and Space Science Library, Vol. 241, Millimeter-Wave Astronomy: Molecular Chemistry & Physics in Space., ed. W. F. Wall, A. Carramiñana, & L. Carrasco, 447–+
- [22] Schieder, R., Horn, J. M., Siebertz, O., Moeckel, C., Schloeder, F., Macke, C., & Schmuelling, F. 1998, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 3357, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, ed. T. G. Phillips, 359–367
- [23] Schieder, R. T., Siebertz, O., Gal, C., Olbrich, M., Schloeder, F., Bieber, R., Schmuelling, F., Tolls, V., & Horn, J. M. M. 2003, in Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference, Vol. 4855, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, ed. T. G. Phillips & J. Zmuidzinas, 290–300
- [24] Shcherbakov, A., Luna, A., & Ledeneva, Y. 2006, in XXI Congreso de Instrumentación SOMI., 1–5
- [25] Shcherbakov, A. S., Balderas, S. E., Tepichin, E., Luna, A., Sanchez-Lucero, D., & Maximov, J. 2007, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, ed. F. M. Dickey & D. L. Shealy, Vol. 6663 (SPIE)
- [26] Shcherbakov, A. S., Luna, A., Balderas, S. E., & Maximov, J. 2007, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, ed. J. Armitage, Vol. 6796 (SPIE)
- [27] Shcherbakov, A. S., Luna, A., Tepichin, E., & Balderas, S. E. 2008, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, ed. M. J. F. Digonnet, S. Jiang, J. W. Glesener, & J. C. Dries, Vol. 6890 (SPIE), 689018
- [28] Smith, T. M., & Korpel, A. 1965, IEEE Journal of Quantum Electronics, 283