



**I  
N  
A  
O  
E**

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

**Construcción de un espectrómetro  
acusto-óptico  
para uso radio astronómico**

**(Reporte Técnico No. 247)**

Abraham Luna C., Alexander Shcherbakov,  
Eduardo Mendoza T.,  
Luis Carrasco B. y Francisco Renero

INAOE

Noviembre 2007

©INAOE 2007

Derechos Reservados

El autor otorga al INAOE el permiso de reproducir  
y distribuir copias de este reporte técnico en su  
totalidad o en partes.





## **RESUMEN**

PRESENTAMOS EL TRABAJO REALIZADO EN LA EVALUACION DE LA CONSTRUCCION DE UN ESPECTROMETRO ACUSTO-OPTICO PARA USOS RADIOASTRONOMICOS EN INAOE. EXPONEMOS LAS JUSTIFICACIONES TECNICA Y CIENTIFICA, Y PLANTEAMOS LA FACTIBILIDAD DEL PROYECTO.

ESBOSAMOS UNA PRIMERA VERSION DEL ESPECTROMETRO PARA EL RADIOTELESCOPIO DE 5 MTS DE DIAMETRO (RT5, EN CONSTRUCCION EN INAOE). PROYECTAMOS HACIA UN LABORATORIO PARA MANTENIMIENTO E INVESTIGACION EN ACUSTO-OPTICA SOPORTADO POR PROYECTOS, INFRAESTRUCTURA Y RECURSOS HUMANOS EXISTENTES EN INAOE.

## **INDICE**

### **1. Introducción**

### **2. Justificación del proyecto**

2.1 Introducción técnica

2.2 Introducción científica

2.3 Evaluación de factibilidad

2.3.1 Infraestructura

2.3.2 Especialistas

2.3.3 Tópicos evaluados

2.3.3.1 RT5

2.3.3.2 Acusto-óptica

2.3.3.3 Expansores

2.3.3.4 Laseres

2.4 Tiempos y costos aproximados

### **3. Especificaciones técnicas preliminares del AOS (Acousto-Optical Spectrometer)**

3.1 Versión laboratorio

3.2 Versión para el RT5

### **4. Bibliografía y Catálogos**

### **5. Apéndices**

A. Proveedores y componentes

B. - Especificaciones técnicas

- Resumen del funcionamiento y control de la celda acusto-óptica.

- Analizador de espectros.

### **6. Agradecimientos**

## 1. INTRODUCCION

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 (Schieder R. et al. 2003). Además, el fenómeno en si tiene diferentes aplicaciones en ramas como las telecomunicaciones e informática y medición de micro-vibraciones mecánicas.

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, electrónica y computo. Actualmente INAOE, en colaboración con UMASS (Universidad de Massachussets), 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 (The LMT book, Irvine, W. et al. 2006).

A su vez, INAOE expande sus fronteras en temas de prioridad nacional como son las telecomunicaciones y computo. Grupos de especialistas en estas áreas se conforman en INAOE, tanto en investigación como en docencia. Esto aunado a la trayectoria y calidad de su planta en el área de óptica y electrónica hacen de proyectos interdisciplinarios, como el planteado aquí, de interés general.

INAOE ha emprendido desde los inicios de la construcción del GTM, la investigación de nuevas tecnologías para solucionar las necesidades y retos que el radio telescopio y sus instrumentos han planteado. Como ejemplo de estas necesidades y consecuencias, se ha creado el laboratorio de superficies esféricas, y se reconstruye un radio telescopio con un paraboloide de revolución de 5m de diámetro 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 sus instrumentos.

El telescopio de 2.1m 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 nos hemos dado a la tarea de evaluar la factibilidad de un espectrómetro acusto-óptico diseñado y construido en INAOE. Aquí presentamos los resultados en esa dirección, como un primer paso en la elaboración del espectrómetro.

## 2. JUSTIFICACION DEL PROYECTO

### 2.1 INTRODUCCIÓN TÉCNICA

La aproximación al rango de altas frecuencias (hasta unos pocos Gigahertz) 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. Solo fue hasta 1937 cuando Raman y Nath desarrollan un modelo ideal que es mejorado por Phariseau en 1956. Hasta este momento el efecto no tenía aplicaciones tecnológicas. Fue con la invención del Láser, el progreso en el crecimiento de cristales y los piezoeléctricos a altas frecuencias, con la 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.

A continuación resumimos las características básicas de los espectrómetros usados para longitudes de onda de radio, milímetros y sub-milimétrico.

#### **Banco de filtros:**

Los bancos de filtros son, quizás, la forma más directa de obtener el espectro de potencias de una señal de radio. La señal 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 grandes, aún uno de tamaño moderado puede ocupar todo un gabinete. Como cada filtro (de hasta cientos de ellos) 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.

Estos espectrómetros son relativamente económicos y de tecnología accesible. Sin embargo, por el hecho de ser muchos filtros independientes, tienen el problema de estabilidad global, lo que repercute en tener que hacer mucho mantenimiento y o restringir el ancho de banda a usar.

#### **Autocorreladores:**

La señal de radio 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 las propuestas de UMASS de este tipo de diseño para los instrumentos de GTM. La tecnología involucrada es accesible pues esta basada en procesadores para el calculo de la transformada de Fourier y correladores que cada vez son más rápidos y económicos. Este

ultimo punto a logrado rebasar las dificultades para alcanzar anchos de banda amplios a muy altas frecuencias (cientos de Gigahertz). Sin embargo siguen demandando un alto consumo energético.

### **Acusto-Ópticos:**

Los espectrómetros acusto-ópticos, quizás, son el diseño más indirecto, pero son populares. La señal intermedia de radio es inyectada a un transductor piezoeléctrico, 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 piezoeléctrico. Esto hace que las diferentes frecuencia de la señal de radio presentes simultáneamente en la celda de Bragg resulten en varios haces difractados. Este patrón de difracción es detectado por algún detector de luz, típicamente un CCD, y el espectro es digitalizado y almacenado en una computadora. Estos dispositivos tienen una alta resolución espectral, anchos de banda relativamente amplios a altas frecuencias (THz) y muy bajo consumo energético lo que los hace muy propios para usos espaciales. Pese a sus cualidades son poco versátiles respecto a resolución y ancho de banda.

Las aplicaciones y usos del fenómeno acusto-óptico es muy amplio y en expansión. Otros usos y aplicaciones de los moduladores acusto-ópticos esta en las áreas de informática, teledetección, telecomunicaciones, optoelectrónica microvibraciones.

- Interruptores Q (en donde el modulador acusto-óptico sirve para bloquear la cavidad del láser antes de que el pulso sea generado, se consiguen pulsos cortos del orden de microsegundos) tienen usos en telecomunicaciones y redes computacionales.
- Moduladores de la potencia del haz del láser, con usos en impresión láser.
- Desplazadores de la frecuencia del haz láser. Con usos en láseres sintonizables.
- Filtros sintonizables en longitud de onda.
  - Vibrómetros Doppler, con aplicaciones en medicina, industria mecánica, automotriz, minería etc.
  - Espectrofotómetros de alta resolución espacial y espectral para la teledetección y usos en astronomía (Molchanov et al. 2005).

## **2.2 INTRODUCCIÓN CIENTÍFICA**

Comúnmente se le conoce como la banda de microondas a ondas electromagnéticas con frecuencias entre los 50 GHz y hasta 3GHz. La astronomía milimétrica y submilimétrica es la ventana electromagnética de más reciente exploración científica y su cobertura va desde frecuencias de 50GHz hasta unos pocos THz. En este rango de longitudes de onda, la atmósfera no es totalmente transparente y presenta atenuación atmosférica como podemos ver en la Figura 1

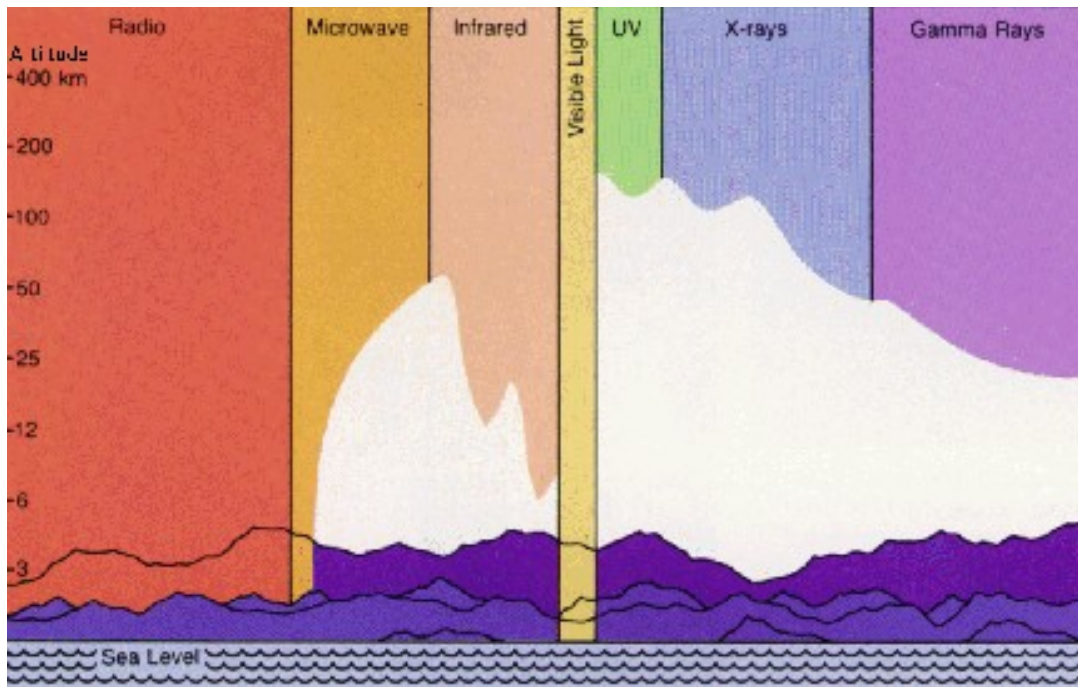


Figura 1. Créditos: NASA

La atenuación atmosférica es principalmente debida a la composición molecular de la atmósfera terrestre, básicamente agua, oxígeno, nitrógeno y dióxido de carbono. Para evitar estas moléculas y la consecuente atenuación de ondas provenientes de objetos astronómicos, los instrumentos para su detección en este rango deben ponerse fuera de la atmósfera o en montañas altas y secas.

Emisión térmica y emisión de líneas moleculares (a través de rotación molecular) son los principales efectos que producen microondas en el universo. Objetos astronómicos relacionados con estos efectos son tópicos primordiales en la astronomía actual: el fondo cósmico de microondas (FCM) y el medio interestelar (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, entre otros.

Observaciones espectrales y en el continuo de estos fenómenos, nos dan información relacionada a los fenómenos y sus procesos físicos. La obtención de detalles de la distribución espacial en estos objetos requiere de resolución espacial, o lo que es lo mismo, grandes aperturas o técnicas interferométricas. También, detalles en la cinemática y/o 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 en las etapas de formación y muerte en la evolución de estrellas, son temas de investigación actual muy importante.

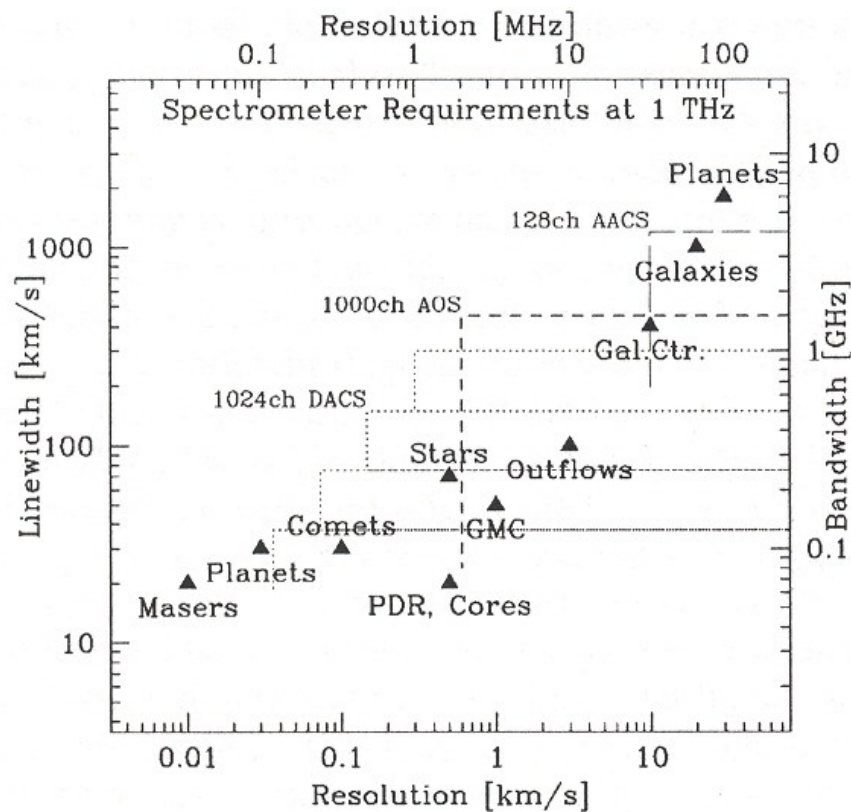


FIGURA 2: “Regiones” óptimas para el estudio de diferentes objetos astronómicos en el submilimétrico (1 THz), en dependencia de la resolución y el ancho de banda. Observe que a esta frecuencia, los espectrómetros acusto-ópticos son bien posicionados para el estudio de los temas de formación estelar y MIE (Harris A. 2000)

Uno de los temas a abordar por parte de la radioastronomía milimétrica es el proceso de formación de las estrellas. Este es un tópico fundamental y de mucho interés para la investigación actual en astronomía; es la piedra angular de cualquier modelo a escalas galácticas y a escalas de sistemas planetarios. Su indisoluble vínculo con el tema del medio interestelar es el mayor reto en estudios actuales, pues es del medio interestelar de donde son creadas las estrellas y éstas a su vez le dan vida y alimento al medio interestelar ¿Cómo es precisamente este mecanismo? Es la pregunta que se aborda desde varios frentes, teórico, computacional y observacional. Por otro lado, como sabemos, la luz que podríamos captar desde los escenarios de formación estelar es bloqueada parcial o totalmente por el medio del que se están formando las estrellas. Las opciones son las frecuencias menores para poder penetrar estas capas de material que generalmente son polvo y moléculas. Estas moléculas en el medio interestelar frío radian principalmente líneas por desexcitación de transiciones rotacionales y/o vibracionales. 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.



Con ayuda del efecto Doppler podemos obtener la cinemática de las regiones usando las líneas emitidas, esto nos permite abordar el tema de la cinemática y dinámica galáctica para el caso de una galaxia completa. Otro tema relevante es el fenómeno de formación estelar en las primeras etapas del universo, tema clave 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 esta clase de estudios.

Los temas que específicamente abordará el RT5 serán: ráfagas solares y máseres interestelares, estos se abordarán en la siguiente sección de tópicos evaluados.

### **2.3 EVALUACIÓN DE FACTIBILIDAD**

Las especialidades en investigación cultivadas en INAOE ofrecen la oportunidad para la construcción de un espectrómetro acusto-óptico tanto por la infraestructura de talleres y laboratorios, como por el conjunto de especialistas, como exponemos a continuación.

#### **2.3.1 INFRAESTRUCTURA:**

El INAOE cuenta con laboratorios de óptica equipados, mesas ópticas, láseres de diferente longitud de onda, polarización y potencia, soportes para posición micrométrica, talleres de componentes ópticas y taller mecánico con experiencia en el ramo.

Para la segunda mitad del 2007, se adquirió ya una celda acusto-óptica de TeO<sub>2</sub> con el proveedor Moltech. Se tiene una laptop específicamente para el control del instrumento (DELL, con Windows y Linux) la cual tiene el software y drivers de control de la celda acusto-óptica (ver apéndices). Con este equipo se ha verificado el funcionamiento adecuado de la celda acusto-óptica con pruebas de control. Adicionalmente para la evaluación y medición de RF tenemos un analizador de espectros, BK Precision modelo 2650, para el rango entre 50kHz y hasta 3GHz. Este último equipo servirá para mediciones y evaluación de señales vía cable o con la antena en RF, así como para una posible calibración del espectrómetro. En el Apéndice B concentramos la información técnica referente a la celda del deflector acusto-óptico y del analizador de espectros.

#### **2.3.2 INVESTIGADORES QUE HEMOS PARTICIPADO**

El grupo que ha participado en la evaluación, gestión y diseño hasta este momento son (en orden alfabético de primer apellido):

Dr. Luis Carrasco (Astrofísica, experiencia en instrumentación astronómica)  
Dr. Abraham Luna (Radioastronomía, responsable del proyecto AOS)  
Dr. Eduardo Mendoza (Radioastronomía, responsable del proyecto RT5)  
Dr. Francisco Renero (Instrumentación óptica)  
Dr. Alexander Shcherbakov (Acusto-Óptica, experiencia en espectrómetros acusto-ópticos)

Al grupo se incorporarán estudiantes y técnicos de las áreas de instrumentación astronómica y óptica para que realicen tesis en algunas de las componentes, la integración y el acoplamiento del AOS al radiotelescopio. Actualmente hay participación de estudiantes de manera indirecta, como los que ensamblan, modelan y ajusta RT5, estudiantes de la coordinación de óptica haciendo tesis en temas de acusto-óptica, etcétera.

El grupo de especialistas ha tenido reuniones técnicas en las que se han abordado temas específicos, discutiendo las posibilidades y requerimientos. En reuniones de subgrupos se han ido precisando los requerimientos de las componentes y se han hecho las selecciones preliminares.

Por ejemplo, para el caso del expansor de haz, se tienen varias alternativas y se probarán dos: con prismas y con lentes. Se evalúa la opción de expansión del haz por prismas, la que será implementada totalmente en INAOE. Se evaluará, también, la posibilidad de realizar las lentes cilíndricas o esféricas de enfoque sobre el CCD en el taller de óptica.

### **2.3.3 TOPICOS EVALUADOS**

Algunos de los temas abordados en diferentes reuniones del grupo han sido resumidas en memorias en extenso de congresos nacionales e internacionales (Scherbakov et al. 2006 y Scherbakov et al. 2007).

- Efecto acusto óptico
- Prismas como expansores de haz.
- Otras opciones de expansores (telescopios)
- Laser (Gas estabilizado Vs Diodo estabilizado)
- Componentes de enfoque
- CCD (lineal 3000 pixels rectangulares de 7x200 micras)
- Resolución de un espectrómetro acusto-óptico
- RT5
- Técnicas observacionales en radioastronomía milimétrica y acoplamiento

En seguida, desarrollamos brevemente estos temas, algunos de ellos tienen documentación publicada, aquí se presentan versiones adaptadas o posteriores. Abordamos, en forma resumida, los temas de RT5 y componentes que se pueden construir en INAOE. Estos temas definen y caracterizan el instrumento así que serán abordados nuevamente en la sección correspondiente al diseño.

#### **- EL RT5**

El radiotelescopio de 5m de diámetro (RT5) fue donado a la UNAM por la Universidad de Texas. La montura y la antena ya se transportaron al INAOE mientras que las piezas de la cúpula se llevaron a Sierra Negra. Con apoyos de un proyecto en ciencias básicas de CONACYT se está reactivando el RT5 con un primer receptor en una banda de 3.9 GHz y otro de 42-43 GHz, planteados tanto para observaciones espectrales como en el continuo. Los temas a abordar por el RT5 son básicamente 2, ráfagas solares y másers de SiO. A continuación presentamos un resumen de estos dos temas y la forma como RT5 los explorará.

## **RÁFAGAS SOLARES:**

Una simplificación hecha por Hanaoka (1999) sobre las ráfagas solares propone la interacción de dos arcos coronales para la creación de una hoja de corriente en la que se aceleran partículas que adquieren gran energía y se mueven siguiendo las líneas de campo magnético. Las partículas que se dirigen a la fotosfera colisionan con las partículas del medio depositando su energía en diferentes capas de la atmósfera solar. Si la energía es alta llegan hasta la base de la fotosfera y sus efectos se pueden ver en un abrigamiento en luz blanca. Cuando la energía es menor, el abrigamiento solo se ve en la cromósfera. Al calentarse, el material sube por los tubos de flujo magnético (evaporación) y es posible verlo en emisiones de ultravioleta y rayos X de baja energía. Las partículas de más alta energía al colisionar emiten rayos X de alta energía y rayos gama producto de interacciones nucleares. Por otra parte, los electrones que se mueven a lo largo de las líneas de flujo radian en longitudes de onda de radio que dependen de la altura a la que se encuentran, por ejemplo a 17 GHz la emisión proviene de la parte baja de la zona de transición Cromosfera-Corona.

Cuando las partículas aceleradas encuentran líneas de campo abiertas salen hacia el espacio interplanetario emitiendo en longitudes de onda de radio cada vez más grandes, desde metros hasta kilómetros. Cuando las circunstancias son adecuadas se observan in-situ como eventos de partículas solares.

El escenario descrito es generalmente similar en todos los modelos de ráfagas solares y solo varía en los detalles. Podemos decir que el proceso está relativamente bien entendido. Sin embargo, solamente hemos hablado de las manifestaciones secundarias del proceso, es decir, todos los procesos mencionados corresponden a la evolución de las partículas una vez que son energizadas. No hemos mencionado el proceso mismo de energización.

En general se acepta que la energía de una ráfaga ( $10^{32}$  ergios) proviene de la energía magnética. De hecho el campo magnético es la única fuente que puede contener la energía necesaria para una ráfaga. Sin embargo, hay varios problemas con los procesos involucrados en el almacenamiento, transporte, desestabilización y liberación de energía que no se han podido resolver hasta el momento. Esto se debe principalmente a la falta de observaciones detalladas del proceso mismo de liberación primaria de energía. Las emisiones de alta energía como los rayos X y los rayos gama reflejan mejor los procesos de liberación primaria de energía pero hasta hace poco tiempo no contábamos con información detallada del posicionamiento de dichas emisiones. Actualmente el satélite RHESSI es capaz de generar mapas de las fuentes de emisión de fotones de alta energía.

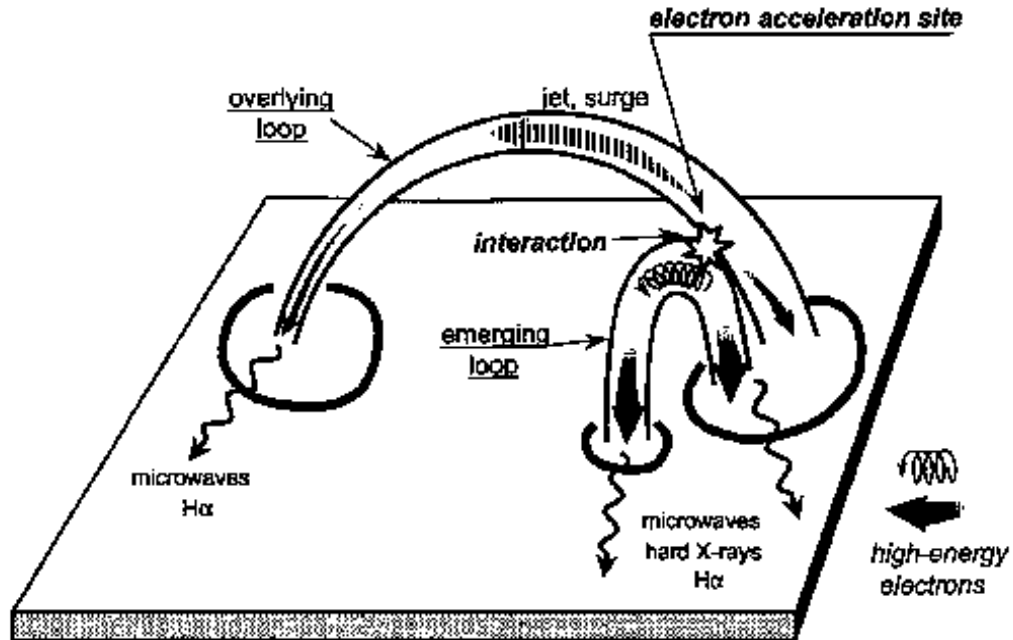


FIGURA 3. Modelo esquemático de una ráfaga solar.

En el rango centimétrico las ráfagas solares son muy intensas. Estudios estadísticos (Klein, 2005) han mostrado que en muchas ráfagas el máximo ocurre en frecuencias cercanas a 10 GHz. Por otro lado, en esas longitudes de onda la absorción atmosférica es baja. Debido a lo anterior, es conveniente en las primeras pruebas de observaciones del Sol emplear alguna frecuencia cercana a 10 GHz. Además, en esas longitudes de onda operan algunos receptores comerciales de TV, los cuales, se pueden adaptar para realizar observaciones del Sol. Uno de ellos es el receptor de 3.9 GHz con el que se está experimentando.

### MASERES COSMICOS:

Las estrellas en sus últimas etapas de vida (conocidas como estrellas tardías) pierden grandes cantidades de material formando una envoltura de gas y polvo. Esta envoltura está compuesta por diversas capas en las que se forman varias moléculas que producen emisión maser en longitudes de onda centimétricas y milimétricas. De acuerdo al conocimiento actual de las envolturas de gigantes rojas, los máseres de SiO están en una envoltura más cercana a la estrella que la de máseres de H<sub>2</sub>O.

La tasa de pérdida de masa y los flujos de SiO no muestran una correlación alta (Nyman and Olofsson, 1986). El rango de velocidades de las fuentes de SiO es pequeño (~ 10 km/seg) y no parece estar correlacionado con la velocidad de expansión de la envoltura (Elitzur, 1992). Estos resultados parecen indicar que la expansión de la envoltura y los máseres de SiO no tienen una estrecha relación.

Los máseres de SiO representan una sonda ubicada muy cercana a la fotosfera de la estrella y que además es sensible al campo magnético. Por lo tanto los

másers de SiO son una herramienta para ver el comportamiento del gas y del campo magnético en esas regiones tan próximas a la estrella. Algunos resultados muestran que los flujos de los másers de SiO repiten las variaciones de la curva de luz de la estrella central con un máximo en la densidad de flujo que se registra en una época de observaciones (Gómez-Balboa, A.M. & Lepine, 1986, Nyman and Olofsson, 1986). Probablemente esto se debe al paso de la onda de choque producida por la estrella central. Las observaciones de másers de SiO no han sido tan regulares como las de H<sub>2</sub>O (Rudnitskij et al. 2000, Lekht et al. 2001) y solo para algunas cuantas fuentes se han determinado los retrasos de la curva de flujo de SiO en relación a la curva de luz de la estrella.

Por otro lado, mediciones de la polarización de másers de SiO muestran que másers individuales agrupados espacialmente tienen polarizaciones muy similares entre sí. Además, la polarización de un grupo difiere de la de otros grupos separados de él espacialmente (Elitzur 1992).

Las fuentes de SiO en envolventes de estrellas tardías se encuentran en distribuciones muy compactas (Cohen 1989). Solo se han podido estudiar con base en observaciones de VLBI y por ello se ha estudiado la distribución espacial de pocas fuentes. Además en la mayoría de los casos solo se ha observado la distribución en una sola fase de la curva de luz (Phillips et al. 2003 y literatura ahí mencionada). El estudio de la polarización de los espectros de los másers de SiO permitirá estudiar el comportamiento de las diferentes zonas de la envoltente durante el paso de una onda de choque. Con esto se podrán estudiar los efectos de la onda de choque en diferentes regiones de la envoltente en las proximidades de la estrella.

Debido a que durante los primeros años el RT5 estará dedicado prácticamente a observar SiO y al Sol es posible tener el tiempo de observación necesario para poder medir las variaciones de los másers de SiO con intervalos de tiempo tan pequeños como ~1 semana. El monitoreo de fuentes de SiO se ha hecho, hasta ahora, con intervalos de tiempo de varios meses (Glenn et al. 2003) con lo cual la incertidumbre en el tiempo de retraso no permite identificar diferencias entre el retraso de SiO y el de H<sub>2</sub>O. El monitoreo con intervalos pequeños podría, incluso, ayudar a identificar mejor los máximos del flujo en casos en los que parece no haber retraso.

### ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL RT5

El ancho a altura media (FWHM) del haz teórico del RT5 se calcula para las dos frecuencias en las que se tienen receptores en proceso de calibración:

$$\Omega_A = \frac{\lambda^2}{A}$$

A 43 GHz :	$\Omega_A = 5.4$ arcmin
------------	-------------------------

A 3.9 GHz :	$\Omega_A = 1 \text{ deg}$
-------------	----------------------------

El foco del RT5 se calcula usando el diámetro, D, y el número f,

$$\# f = \frac{F}{D},$$

Con D = 5m, el diámetro, y #f=0.5, el número f calculamos la distancia al foco, F = 2.5, así teóricamente el foco del RT5 deberá estar a 2.5 m del vértice del paraboloide.

Otro dato importante es la escala de placa del RT5, y la podemos calcular:

$$s = 205.265 / F = 82.106 \text{ "/mm}$$

### - Técnicas observacionales en radioastronomía milimétrica

El tema de técnicas observacionales resulta relevante por el hecho de que el interferómetro deberá ser sincronizado con el radiotelescopio. Como veremos a continuación, esencialmente las técnicas son alternando entre dos “estados” del receptor, esta alternancia debe ser sincronizada para hacer los registros adecuados de los espectros.

**Alternando en posición** El método de *position switching* consiste en mover ligeramente el telescopio durante la observación, de manera que se va alternando entre medidas en la fuente y medidas fuera de la fuente. Este movimiento lo realiza automáticamente el programa de adquisición de datos, por lo que no es necesario realizarlo manualmente. Con este método se obtienen dos conjuntos de medidas distintos, uno de ellos contendrá la información de la fuente, incluyendo el ruido de fondo, y el otro será únicamente ruido. Para rescatar los datos espectroscópicos procedentes únicamente de nuestra fuente, basta restar ambos conjuntos.

El mayor problema que presenta esta forma de observación es la pérdida de tiempo de observación real que se produce cuando se observa fuera de la fuente. De esta forma, si dedicamos 60 segundos a la observación total, sólo 30 de ellos serán en nuestra fuente, por lo que si quisiéramos realizar una observación con una integración real sobre la fuente de 60 segundos, deberemos emplear 120 s en total.

**Alternando en frecuencia** El método del *frequency switching* tiene una explicación un poco más compleja. Consiste en realizar observaciones siempre sobre el objeto de nuestro interés, pero variando ligeramente, y de manera alternada, la frecuencia central de la observación. Así, la mitad del tiempo de observación el espectro estará centrado en la frecuencia de la línea que estamos observando y el resto del tiempo centraremos el espectro en una frecuencia próxima a ella, de manera que entre en el rango de nuestro espectrómetro. En este caso tendremos dos conjuntos de espectros centrados en dos frecuencias

ligeramente distintas. Al igual que en el caso anterior, para eliminar el ruido restamos estos dos conjuntos. Nos encontraremos entonces que en el espectro resta, en el cual ya no tenemos ruido, aparece dos veces la línea medida, una con valores positivos y otra con negativos.

Con este método no se pierde tiempo de observación, ya que las dos líneas que aparecen en el espectro resta son iguales y proceden del objeto de nuestro interés, por lo que para recuperar toda la señal, sólo tenemos que invertir la mitad del espectro y sumarle la otra mitad. El resultado final será un espectro cuyo tiempo total de integración real sobre la fuente será el que hemos empleado en tomarlo.

**Alternando en haz.** El método *beam switching* es semejante al alternando en posición con la diferencia de que solo se mueve un espejo secundario en lugar de mover la antena completa. Este espejo secundario esta orientado para recibir la radiación de una dirección diferente del cielo, pero cercana en unos pocos minutos de arco, al objeto de estudio. Normalmente se sincroniza sobre unas aspas giratorias para alternar muy rápidamente entre el objeto (On) y la referencia (OFF). El método esta restringido por sus cualidades a objetos aislados.

Con este método el tiempo perdido entre objeto y referencia es menor que para el caso de alternar en posición.

**Acoplamiento del espectrómetro al radio telescopio.** La detección de señales débiles ocultas por ruido de fondo es uno de los problemas técnicos más comunes a resolver al efectuar mediciones eléctricas. En estos casos la única forma práctica de detección es la síncrona, es decir, la alternancia entre la señal presente y ausente en la medida. Sin embargo, el tiempo de la alternancia no puede ser cuales quiera valor, la estabilidad del sistema será la que dicte el valor apropiado para garantizar una buena medición.

La estabilidad del espectrómetro deberá evaluarse en detalle pues esto limitará el tiempo de integración sobre el objeto a observar. Del mismo modo la estabilidad de cada parte del sistema antena-espectrómetro deberán ser evaluados. La técnica observacional depende del objeto a estudiar, sin embargo habrá objetos que admitan varias de estas o combinaciones. La combinación de técnica y del sistema antena-espectrómetro quedará especificada por la estabilidad temporal que este presente al realizar una medida. Para la evaluación de sistemas de este tipo es muy recomendable usar la varianza Allan (Shieder et al. 1985).

Análisis del acoplamiento realizado por Delgado (1989), para el acoplamiento de un espectrómetro acusto-óptico con el radiotelescopio de Onsala será la guía para esta etapa del proyecto.

## - Óptica de enfoque, High Resolution Large Format Lenses

Presentamos los requerimientos ópticos para el sistema de enfoque de un espectrómetro acusto-óptico. Edmund Optics ofrece sistemas ópticos de formato grande que pueden cubrir los requerimientos.

El AOS tiene dos sistemas ópticos principales, el llamado colimador y el sistema de enfoque. Revisando catálogos encontramos algunos sistemas ópticos, en el catálogo de Edmund Optics, que cubren los requisitos, estos sistemas llamados lentes de gran formato, han sido diseñados para aplicaciones en detectores CCD lineales. El diseño del sistema óptico de enfoque puede ser hecho en su totalidad e incluso su construcción en los talleres de óptica de INAOE, pero esta alternativa se plantea para versiones futuras del AOS.

Las especificaciones del sistema óptico dependen de la función a realizar por este sistema. El sistema de enfoque concentrará la luz refractada por la celda acusto-óptica hacia el detector lineal.

Parámetros del objeto e imagen.

Tamaño del objeto (mm)	Tamaño de la Imagen (mm)	Tamaños del pixel del CCD lineal ( $\mu\text{m}$ )	Distancia de trabajo (cm)
40	21	7	< 30

Esto significa que la restricción óptica de magnificación es de 0.525. Otra restricción será el tamaño de la mancha producida por el sistema de enfoque la cual debe ser menor a  $7 \mu\text{m}$ .

El sistema óptico que a continuación se especifica, tiene un rango de magnificación de 0.5-0.9X y una resolución de 72 lp/mm. Y cubre los requerimientos anteriores.

	Referencia de Catálogo	Costo
Large Format Lens 0.7X	M58-481	995.00 USD
0.7X Focus/Mounting Option	Depende de camera	1,495.00 USD
Focus Tube Mounting Clamp	M58502	199.00 USD

En las especificaciones de este sistema aparece que el campo de visión (FOV) de este tiene, para cámaras de 22mm, un FOV de 31.4 mm. Sin embargo esta especificación es calculada para la magnificación nominal (7X).

Otra opción a considerar para el sistema de enfoque son: singuletes, dobletes o tripletes de lentes, los cuales son baratos pero podrían no satisfacer los requerimientos.

La magnificación dada por:

$$m = \frac{hi}{ho}, \quad (1)$$

o

$$m = \frac{f}{x}, \quad (2)$$

donde  $hi$  y  $ho$  están relacionadas con el tamaño en los planos imagen y objeto respectivamente,  $f$  es la longitud focal efectiva y  $x$  es la distancia desde el plano



objeto hasta el primer punto focal (Hecht, S., Optics)

Otra expresión útil,

$$xx' = f^2, \quad (3)$$

Donde  $x'$  es la distancia desde el plano imagen hasta el Segundo punto focal. Así, si fijamos la magnificación, las relaciones (2) y (3) pueden estimar  $x$  y  $x'$  para un  $f$  dado y calcular la longitud total del sistema. El siguiente paso es calcular el FOV, el cual puede calcularse una vez fijo  $f$ . Por ejemplo, para un doblete de igual a 100mm, el FOV es menor a  $4^\circ$ .

Problemas por resolver en este caso, son: Encontrar el óptimo desempeño del doblete de lentes y montarlos mecánicamente.

### - Principal aspects of designing the acousto-optical spectrum analyzer of radio-astronomic signals for the Mexican Large Millimeter Telescope

Alexandre S. Shcherbakov, Abraham Luna Castellanos, and Yulia N. Ledeneva  
National Institute for Astrophysics, Optics & Electronics, A.P.51 y 216, 72000,  
Puebla, Mexico.

And

Jewgenij Maximov

Molecular Technology GmbH, Rudower Chaussee 29-31, 12489, Berlin, Germany

#### Abstract

We consider a few technically important problems related to creating a new acousto-optical spectrometer for the analysis of radio-astronomical signals. This project lies in a line with the program of developing the metrology for the Mexican Large Millimeter Telescope. The main attention is paid to such problems of implementing the spectrometer as: 1) selecting the regime of operation for acousto-optical modulator; 2) estimating its bandwidth and resolution; 3) acoustic attenuation along the aperture of modulator; 4) designing the prism-made optical beam shaper.

#### 1. The regime of operation for the acousto-optical modulator

It is well known that rather effective acousto-optical interaction can be easily achieved in an experiment without any observable effect of the scattering process on the acoustic wave, when the powers of the incident light and ultrasound are close to each other and neighbor  $\sim 100$  mW. Here, we assume that the area of propagation for the acoustic wave, traveling almost perpendicular to the light beams, is bounded by two planes  $x=0$  and  $x=L$  in a medium, and take into account joint angular-frequency mismatches of the wave vectors. Physically, scattering light by acoustic waves can be described in classical terms of light diffraction by acoustic grating. The propagation of acoustic wave through photo-elastic medium is attended with originating the traveling periodic variations in the refractive indices of this medium. The pattern of diffraction depends essentially on

the length  $L$  of interaction between light and acoustic waves, so the regimes of diffraction comprise two limiting cases, corresponding to a short or large lengths of interaction. If  $L$  is sufficiently short, the acoustic grating may be treated as a thin one, and the diffraction maxima are given by  $\sin \theta_p = \sin \theta_0 + p \lambda / n \Lambda$ , where  $\theta_p$  is the direction at the  $p$ -th maximum ( $p=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ),  $\theta_0$  is the angle of incidence for light beam with a wavelength of  $\lambda$ ,  $n$  is the characteristic refractive index of a medium, and  $\Lambda$  is the acoustic wavelength. The diffraction pattern includes a symmetrical wealth of maxima, disposed bilaterally along the direction of passing the incident light beam, providing the conservation laws for both the energy and the momentum, see Fig.1a. Such a regime is identified as the Raman-Nath diffraction that takes place under almost all the angles of light incidence on a thin acoustic grating with  $Q = \lambda L / \Lambda^2 \ll 1$ . The other regime of light diffraction occurs with a large  $L$ . In this case the dynamic acoustic grating is rather thick, so during

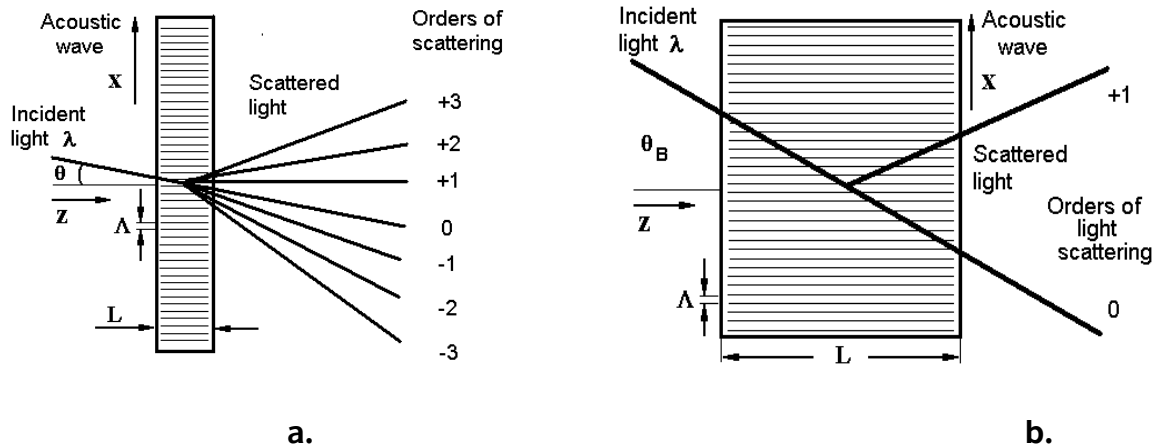


Figure 1. Scattering light by a thin (a) and thick (b) dynamic acoustic gratings.

the analysis of diffraction one has to take account of the phase relations between waves in different orders. Such a regime can be realized only when the angle of light incidence  $\theta_B$  on a thick acoustic grating meets the Bragg condition  $\sin \theta_B = \lambda / 2 n \Lambda$  and  $Q = \lambda L / \Lambda^2 \gg 1$ . Usually, the Bragg regime includes the incident and scattered light modes as well as the acoustic mode, see Fig.1b. The light intensities in orders of scattering are shown in Fig.2, where  $q = \pi (\lambda \cos \theta)^{-1} \sqrt{2 M_2 P S^{-1}}$ ,  $M_2$  is the acousto-optic figure of merit,  $P/S$  is the acoustic power density. This figure illustrates both the Raman-Nath and Bragg limits of light diffraction. One can see that the Bragg regime is preferable for applications due to an opportunity to realize 100% efficiency of light scattering.

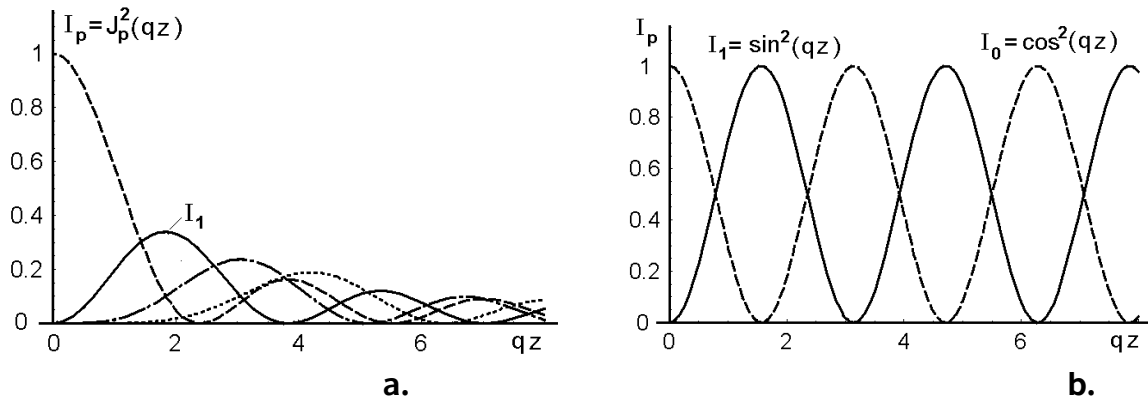


Figure 2. Scattering light in the Raman-Nath limit (a) and in the Bragg limit (b).

## 2. The bandwidth and resolution of acousto-optical spectrometer

The conservation laws inherent in such interactions are  $\vec{k}_1 + \vec{k}_2 = \vec{k}_3$  for the wave vectors (or the momenta) and  $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$  for the angular frequencies (or the energies). Usually in the acousto-optics,  $\omega_1, \omega_3 \approx 10^{14}$  Hz and  $\omega_2 = \Omega \leq 10^9$  Hz, so  $\Omega/\omega_1 \approx 10^{-5}$  and  $E_{\text{photon}} \approx 10^5 E_{\text{phonon}}$ , i.e. if the powers of light and ultrasound have the same order, one has much more (about  $10^5$ ) phonons than photons in such an experiment. By this is meant that the acousto-optical interaction can be considered in an approximation of a given acoustic field. Finally, because  $c = 3 \cdot 10^{10}$  cm/s and  $V \approx 3 \cdot 10^5$  cm/s, we yield  $V/c \approx 10^{-5}$ ,  $\omega_1/c \approx \Omega/V$ , and  $k_{\text{photon}} \approx K_{\text{phonon}}$ .

Usually, the geometry of interaction has rather wide optical beam, whose angle of spreading  $\delta\theta$  is small, and a narrow acoustic beam, whose angle of spreading is  $\delta \approx V/l \gg \delta\theta$ , see Fig.3.

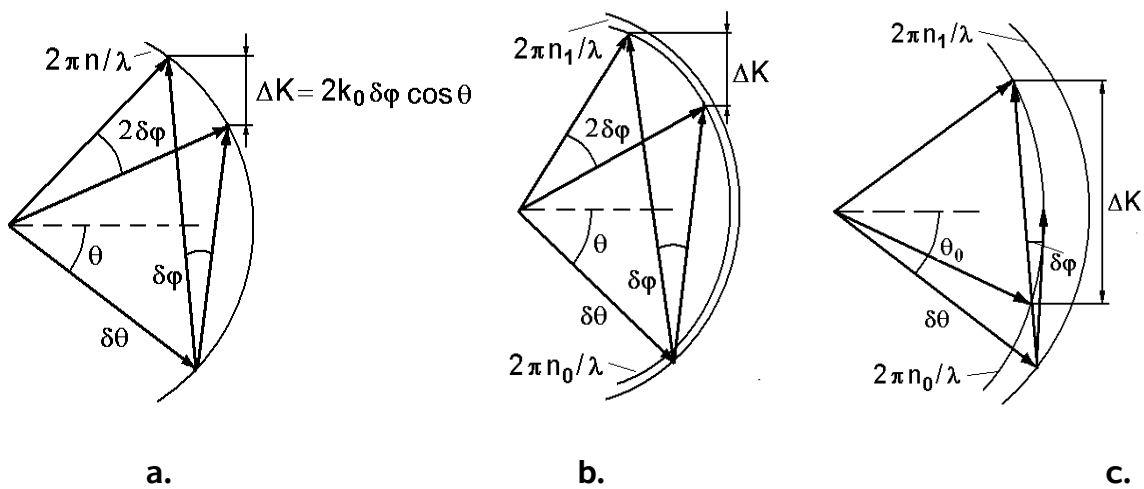


Figure 3. Vector diagrams related to the bandwidth of normal (a), non-optimized anomalous (b), and optimized anomalous (c) light scattering.

Assuming that  $\delta \approx \Delta\theta$  and  $\cos \theta \approx 1$ , one can estimate the bandwidth of normal Bragg interaction as  $\Delta F_1 \approx 2 n V^2 / (\lambda L f)$ . In anomalous Bragg regime, one can choose the particular frequency  $f_0 = V \lambda^{-1} \sqrt{|n_e^2 - n_o^2|}$  and obtain the bandwidth of the optimized anomalous Bragg interaction as  $\Delta F_0 \approx 2 V \sqrt{2 n_o / (\lambda L)}$ . Practically,  $\Delta F_0 / \Delta F_1 \approx \sqrt{2 |n_o - n_e| L / \lambda} > 1$ , so that anomalous Bragg regime is preferable for applications because of its wider bandwidth.

The Heisenberg uncertainty principle proclaims that each acoustic phonon can be localized along the aperture  $D$  with an accuracy of  $\delta x \delta p \approx h$ . Due to  $\delta p = \hbar \delta K = 2 \pi \hbar V^{-1} \delta f = h V^{-1} \delta f$ , we yield  $\delta x V^{-1} \delta f \approx 1$ . Then  $\delta f \approx V / \delta x$ , where one has to take  $\delta x = D$ . Finally, the ultimate frequency resolution is given by  $\delta f \approx V / D$ . The limiting number  $N$  of spots can be estimated as  $N = \Delta F_0 / \delta f$ .

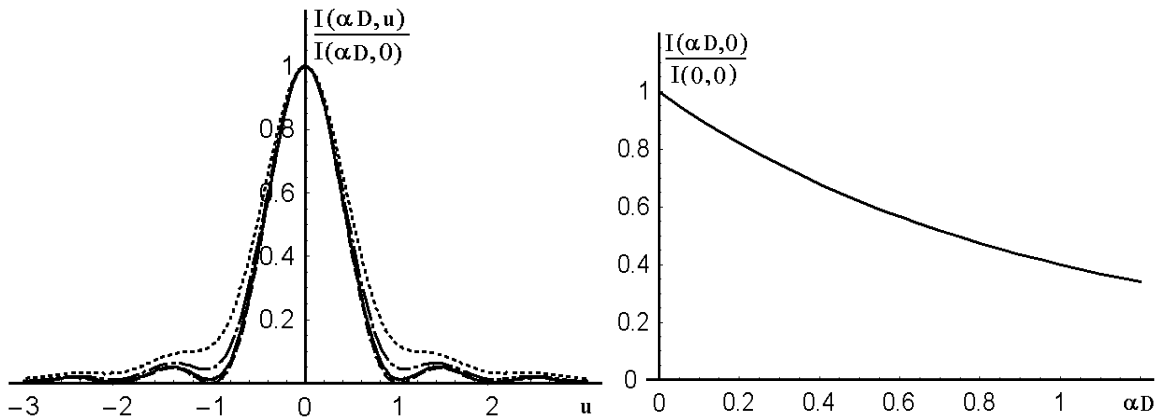
### 3. Effect of the acoustic attenuation along the modulator aperture

The influence of an acoustic attenuation can be described by the parameter  $\alpha = \kappa \xi T f^2 / (\rho V^5)$ , where  $\kappa$  is the adiabatic thermal conductivity,  $\xi$  is the Gruneisen constant,  $T$  is the absolute temperature,  $\rho$  is the matter density. Acousto-optical materials are usually characterized by the constant  $\Gamma = \alpha / f^2$  [dB/(cm·GHz<sup>2</sup>)]. That is why the issuing light amplitude distribution takes the form  $E(x) = E_0 \exp(-\alpha x)$ , and the total intensity of the issuing light is  $\frac{I(\alpha D)}{I(0)} = \frac{1 - \exp(-2\alpha D)}{2\alpha D}$ . Thus, a part of the scattered light will be lost, and

the effect of the acoustic losses on the resolution takes place. The normalized light intensity  $\frac{I(\alpha D, u)}{I(\alpha D, 0)} = \frac{\sin^2(\pi u) + \sinh^2(\alpha D/2)}{[1 + (2\pi u/\alpha D)^2] \sinh^2(\alpha D/2)}$  at the focal spot is

shown in Fig 4a (here  $u = x_1 D / \lambda F$ ,  $x_1$  is the coordinate on the focal plane,  $F$  is the focal distance of the integrating lens). It is perturbed only a slightly, if  $\alpha \leq 6$  dB/cm. The effect of total losses along the aperture on a spot maximum is defined

by  $\frac{I(\alpha D, 0)}{I(0, 0)} = \left[ \frac{1 - \exp(-\alpha D)}{\alpha D} \right]^2$ , Fig.4b.



a.

b.

Figure 4. Effect of the acoustic attenuation: (a) the normalized light intensity in the focal spot; solid line is for  $\alpha=0$  , dashed line is for  $\alpha=3$  dB/cm, dash-dotted line is for  $\alpha=6$  dB/cm, and dotted line is for  $\alpha=10$  dB/cm; (b) the light intensity in a maximum of the focal spot as a function of  $\alpha D$  .

#### 4. Optical beam shaper based on prisms

Another important factor determining the energetics in a system is connected with matching the initial size of laser light beam with the optical aperture of modulator in the plane of light scattering. To realize a one-dimensional broadening of the laser beam one can exploit the prism beam shaper. Such a shaper can be designed relatively simply, it is rather compact even with large factor of broadening and can be done tunable in behavior. Using the well-known relations for the light refraction in a glass, one can easily obtain the factor of beam broadening, see Fig.5, by one prism:

$$B_1 = \frac{d_1}{d_0} = \frac{\sqrt{(n^2 - \sin^2 \alpha)} \cdot [1 - n^2 \sin^2(\alpha - \delta)]}{n \cos \alpha \cdot \cos(\alpha - \delta)}, \text{ where } \delta = \arcsin\left(\frac{\sin \alpha}{n}\right) \text{ and } n \text{ is}$$

the refractive index. In the simplest case, when all the prisms are identical and the angles of incidence are the same, one can write  $B_m = (B_1)^m$  . Even in the simplest case, when all the prisms are identical, one can take more than 1 prism. If the number of prisms is even, the beam direction can be saved with a precision of a parallel shift. That is why the numbers  $m = [1, 2, 4]$  are taken for consideration. The transmission of prism beam shaper depends on the factor of beam broadening and the polarization of light. With the laser beam diameter of about  $d_0 = 1$  mm and the needed optical aperture for a modulator of about  $D = 35$  mm, one can consider the cases with  $m = 2$  or  $m = 4$  . The corresponding angles of incidence become to be rather large. When the state of light polarization is orthogonal to the beam-broadening plane, the transmission  $T_m(\perp)$  can be estimated as

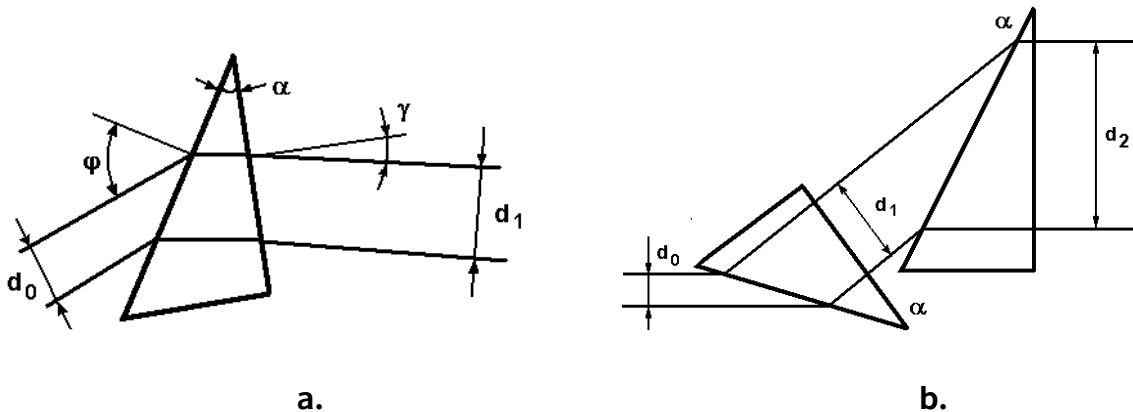


Figure 5. Passing the light beam through a glass prism: (a)  $m=1$  , (b)  $m=2$  .

$$T_m(\perp) = \left\{ \left[ 1 - \frac{\sin^2(\delta - \gamma)}{\sin^2(\delta + \gamma)} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{\sin^2(\gamma - \alpha + \delta)}{\sin^2(\gamma + \alpha - \delta)} \right] \right\}^m, \quad \text{where } \delta = \arcsin\left(\frac{\sin \alpha}{n}\right)$$

and  $\gamma = \arcsin[n \sin(\alpha - \delta)]$ . If the light polarization lies in the beam-broadening plane, one can yield  $T_m(\parallel) = \left\{ \left[ 1 - \frac{\tan^2(\delta - \gamma)}{\tan^2(\delta + \gamma)} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{\tan^2(\gamma - \alpha + \delta)}{\tan^2(\gamma + \alpha - \delta)} \right] \right\}^m$ .

However, generally,  $T_m(\perp) < T_m(\parallel)$ , so that only the last case is presented here and the values of  $n=1.5$  and  $\alpha=30^\circ$  are taken just for an example, see Fig.6. In the particular case of lying the light polarization in the beam-broadening plane, we arrive at the following combined diagram for the beam broadening and the transmission. For instance, one can select  $B=40$ , so that there are two options: 1)  $m=2$ ,  $\alpha_2 \approx 80^\circ$ ,  $B_2 \approx 40$ , and  $T_2 \approx 0.55$  (i.e. 55%) or 2)  $m=4$ ,  $\alpha_4 \approx 67^\circ$ ,  $B_4 \approx 40$ , and  $T_4 \approx 0.78$  (i.e. 78%). Then, the top angle  $\alpha$  of prisms can be optimized. Again, we take  $m = \{2, 4\}$  and  $n=1.5$  for the same case of lying the light polarization in a beam broadening plane and find the contribution of the top angle  $\alpha$ , see Fig.7. One can see that the influence of this angle is not to much, but it can be considerable in a view of precise optimization of the prism shaper performances.

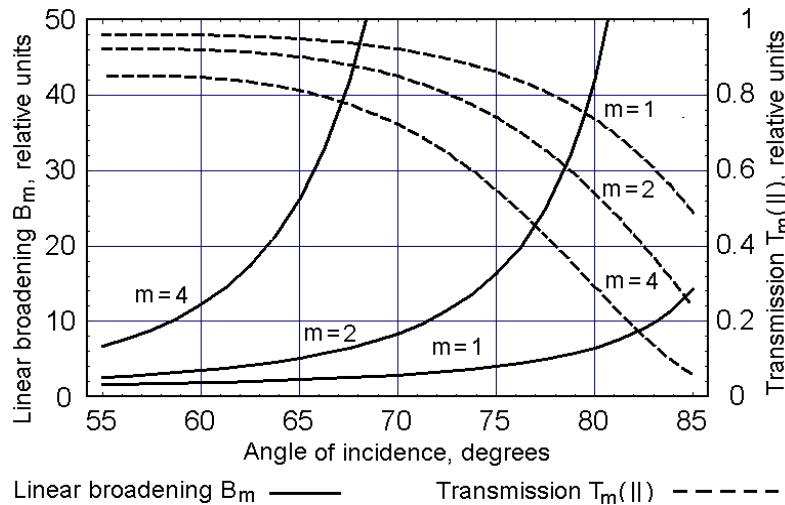
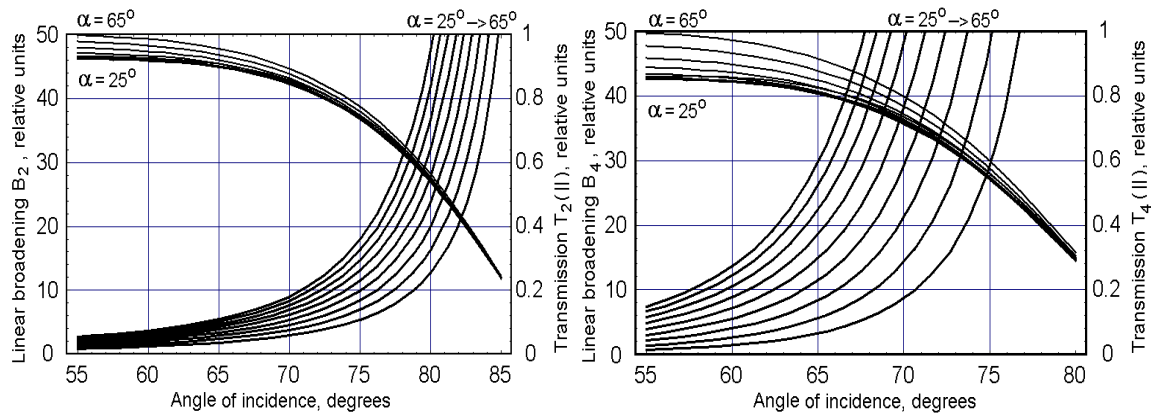


Figure 6. Diagram illustrating the beam broadening and the transmission in various prism shapers



**a.** **b.**

Figure 7. Diagrams illustration the effect of varying the prism top angle  $\alpha$  : (a)  $m=2$  , (b)  $m=4$  .

## 5. Conclusion

Some important technical problems, connected with constructing a new acousto-optical spectrometer for the analysis of radio-astronomical signals have been studied. In particular, we have investigated choosing the regime of operation for acousto-optical modulator in such a spectrometer and determining both the frequency bandwidth and the frequency resolution of this device. Then, the effect of acoustic attenuation along the aperture of acousto-optic modulator has been analyzed. Finally, we have touched the principle aspects of implementing and designing the prism-made optical beam shaper using even numbers of prisms for the spectrometer.

### 2.4 TIEMPOS Y COSTOS APROXIMADOS PARA EL PROYECTO.

El proyecto como se ha planteado, tendrá una duración mínima de tres años hasta la utilización del AOS para usos astronómicos. Se requiere incorporar estudiantes y/o técnicos desde los primeros pasos de diseño y de la implementación en laboratorio. Para dar continuidad en mantenimiento futuro e impulso al área tanto de instrumentación como en particular a la de fenómenos acusto-ópticos, es indispensable la participación de estudiantes como tesis y de un laboratorio.

La construcción se ha planeado en etapas:

1a. Demostración experimental en laboratorio de un espectrómetro acusto-óptico (2o. Semestre 2007).

2a. Diseño y construcción del espectrómetro en la versión para RT5 (desde el segundo semestre de 2007).

3a. Acoplamiento a RT5 ( 2º. Semestres de 2008)

4a. Evaluación y diseño de un Espectrómetro Acusto-Óptico de banda ancha, alta resolución a altas frecuencias apoyado en la creación de un laboratorio de acusto-óptica.

<b>CRONOGRAMA</b>	1er. Y 2º. Semestres 2006	1er. Y 2º. Semestres 2007	1er. Semestre 2008	2o. Semestre 2008	1er. Semestre 2009
Evaluación					
Diseño					
Construcción					
Versión Lab					
Versión RT5					
Laboratorio AO					

La primera etapa requiere de la adquisición de equipo de laboratorio y de partes específicas del espectrómetro. Actualmente se está en el análisis y evaluación de cotizaciones. Esta etapa de laboratorio se ha planeado para que rebese la parte demostrativa del efecto acusto-óptico como espectrómetro, y se planea que se integrará como instrumento para el radio telescopio de 5m de diámetro (RT5) y/o

como analizador de espectros acoplado a otras antenas o redes para la evaluación de interferencia.

### COSTOS DE LAS COMPONENTES PRINCIPALES DEL AOS

	DESCRIPCION	COMPAÑÍA Y PRECIO	CANTIDAD	TOTAL (Dls. USA)
1	Breadboard 30x60 cm	ThorLabs \$647	1	647
2	Laser diode light source Module	Newport \$1540	1	1 540
3	Laser power supply	Newport \$265	1	265
4	Laser beam expander	ThorLabs \$550	1	550
5	CCD line camera (3000)	AMES photon. \$1800	1	1800
6	Software de control de CCD	AMES photon. \$1000	1	1000
7	Deflector acusto-óptico (633nm)	Moltech \$7400	1	7400
8	Laptop (control)	DELL \$1000	1	1000
9	MVO line scan lenses	Edmund Optics \$1500	1	1500
10	Analizador de espectros	BK-presicion \$4000	1	4000
11	XYZ translation stage	ThorLabs \$798	1	798
12	High precision rotation mount	Thorlabs \$312	1	312
13	Tilt and rotation plataform	Thorlabs \$706	1	706
14	Mirror	INAOE	2	----
15	Prisms	INAOE	2	----
16	Postes, anclas, tornillos, etc.	varios		1000
	<b>PARCIAL REDONDEADO</b> (sin gastos envío e impuestos)			<b>25 000</b>
<b>TOTAL</b> (estimando envío + impuestos)				<b>50 000</b>

### 3. ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL AOS

#### 3.1 AOS, VERSION DE LABORATORIO

La etapa uno es la implementación en laboratorio del efecto acusto-óptico. Se tiene listo un diseño preliminar, y se realizan las compras del equipo para su implementación. Los parámetros de cada equipo se anexan en las cotizaciones respectivas y un esquema del diseño preliminar se muestra en la figura siguiente, la lista de precios y compañías proveedoras se muestran en el apéndice A.



Para la implementación en laboratorio se ha optimizado para utilizar materiales con los que actualmente se cuenta en los laboratorios. Para la etapa de ensamble del instrumento como espectrómetro se requiere comprar y fabricar equipo. El Deflector A-O se ha adquirido y se realizan las primeras pruebas de su funcionamiento (Schervakov et al. 2007). Sin embargo la gama de posibilidades en el tema de celdas deflectoras acusto-ópticas es variada, permitiendo abordar varios rangos en frecuencia central, ancho de banda y resolución. La siguiente tabla muestra materiales típicos usados en acusto-óptica.

	SiO <sub>2</sub> α	PbMo O <sub>4</sub>	LiNbO <sub>2</sub>	TeO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	T-3	GaP
	-		-	-			-
<b>Frecuencia central (MHz)</b>	1500 210	500	1000 1050 500	65 45	30	36	630 300
<b>Banda (kHz)</b>	350 39	45	180 500 250	28 21	3	24	300 150
<b>Resolución (kHz)</b>	450 130	450	600 1000 1000	60 40	30	120	850 850
<b>Número de canales</b>	780 300	100	300 500 250	450 512	100	200	350 180

Recientes resultados han mostrado otra aplicación usando filtros acusto-ópticos para espectrofotómetros de alta resolución espacial y espectral. Es decir, obtención de imágenes en bandas muy angostas, del orden de 1arcsec en resolución espacial y 13 Armstrongs de ancho de banda; cubriendo rangos desde infrarrojo hasta ultravioleta (11000-6300Å). Ver por ejemplo Molchanov et al. 2005.

El tema, infraestructura y perspectivas de un laboratorio para mantenimiento del espectrómetro y estudio del fenómeno acusto-óptico nos ha permitido participar en congresos con proyectos en elaboración. A continuación están los resúmenes de la participación en Photonics North 2007, en Canadá.

**- Optical modulators exploiting a multi-phonon light scattering in TeO<sub>2</sub>-structures**

**Alexandre S. Shcherbakov, A. Luna Castellanos, S. E. Balderas Mata**  
*National Institute for Astrophysics, Optics, and Electronics, A.P. 51 y 216, Puebla, 72000 Mexico. E-mail: alex@inaoep.mx, aluna@inaoep.mx, smata@inaoep.mx.*

We study nonlinear dynamics of the optical components inherent in a new type of two-, and three-phonon scattering of light in the Bragg regime under specially chosen conditions in optically anisotropic tellurium dioxide crystalline structures. A set of modes appears within the interaction between a triplet (see Fig.1a) or quartet of the incident light beams under action of a square-law nonlinearity in similar structures. The performed analysis, based on the diagram technique, and numerical simulations for the elaborated exact models are devoted to amplitude and frequency characteristics of these processes and allows 100% efficiency of scattering in each optical mode  $\omega_m$ . We put forward exploiting these nonlinear phenomena for implementing novel effective waveguiding modulators of light operating in analogue or digital (all-optical logic based) regimes.

The proposed models of a multi-phonon light scattering as well as the advanced optical modulators based on TeO<sub>2</sub>-structures ( $n_0 = 2.26$ ,  $V = 0.616 \cdot 10^5$  cm/s) were examined experimentally in the visible range. At the Bragg angle  $\theta$  alignment, the phonon carrier frequency  $f = \Omega/2\pi$  was tuned from **50** to **80** MHz and their power density  $P$  was varied. In particular, we have observed the 100% efficiency of a two-phonon scattering in each optical mode at  $P \approx 1$  mW/mm<sup>2</sup>. Measuring the frequency bandwidth has given  $\Delta f_2 \approx 16$  MHz at  $\lambda = 488$  nm and  $\Delta f_3 \approx 4.5$  MHz at  $\lambda = 442$  nm, see Fig.1b, c. Thus, applying these regimes, for example, to spectrum analysis leads to grow their resolution due to higher angular selectivity of multi-particle processes, because  $\theta \approx m\lambda f / (2n_0 V)$ . In digital schemes, they will be useful in arranging all-optical multi-beam logic gates.

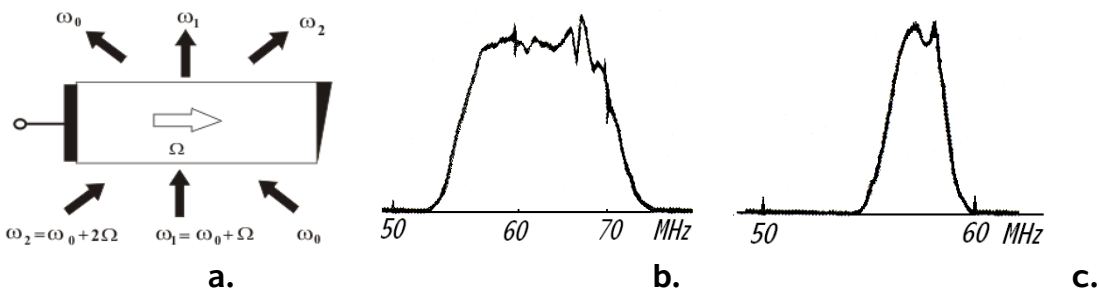


Fig.1. Optical scheme (a) and intensity-frequency plots for a two-phonon,  $m = 2$  (b) and three-phonon,  $m = 3$  (c) light scattering processes in tellurium dioxide structures

**- Upgrading the frequency resolution of the spectrum analyzers for radio-astronomy due to exploiting a multi-phonon light scattering in TeO<sub>2</sub> crystalline modulators**

**A.S. Shcherbakov <sup>1)</sup>, A. Luna Castellanos <sup>1)</sup>, S.E. Balderas Mata <sup>1)</sup>, Je. Maximov <sup>2)</sup>**

*1) Nat. Inst. for Astrophysics, Optics & Electronics, A.P.51 y 216, Puebla, 72000 Mexico.*

*2) Molecular Technology GmbH, Rudower Chaussee 29-31, Berlin, 12489, Germany.*

*E-mail: alex@inaoep.mx, aluna@inaoep.mx, smata@inaoep.mx, Mtberlin@aol.com*

We consider an actual problem related to creating an optical spectrometer for the analysis of radio-astronomical signals, being in a line with developing modern metrology for the new Large Millimeter Telescope (Mexico), operating from 2006. This spectrometer represents an analogue sub-system for optical processing of complicated signal in a range corresponding to one of the transparency windows of Earth atmosphere. Initially, that spectrometer was oriented to using TeO<sub>2</sub> crystalline modulator operating in conventional regime of Bragg light scattering. Such a regime provides the frequency resolution  $\delta f_1 = V/D$  (here  $V$  is the velocity of the operating signal,  $D$  is the modulator aperture) at the level of **16 – 20** KHz due to  $V = 0.616 \cdot 10^5$  cm/s and  $D = 4.0$  cm. However, we have found that realizing the regimes of two- or three-phonon light scattering in this modulator makes it possible to double or triple, respectively, the frequency resolution and to reach a level of a few KHz with the same modulator aperture. Physically, it is connected with the improved angular sensitivity of multi-particle processes. The regimes of a multi-phonon light scattering and the advanced TeO<sub>2</sub> optical modulators were estimated analytically, simulated numerically, and successfully examined experimentally, see Fig.1, in the visible range ( $\lambda = 442$  nm and **488** nm) for the phonon frequencies **50 - 80** MHz and their power density up to **1** mW/mm<sup>2</sup> providing the modulation efficiency close to **100%**.

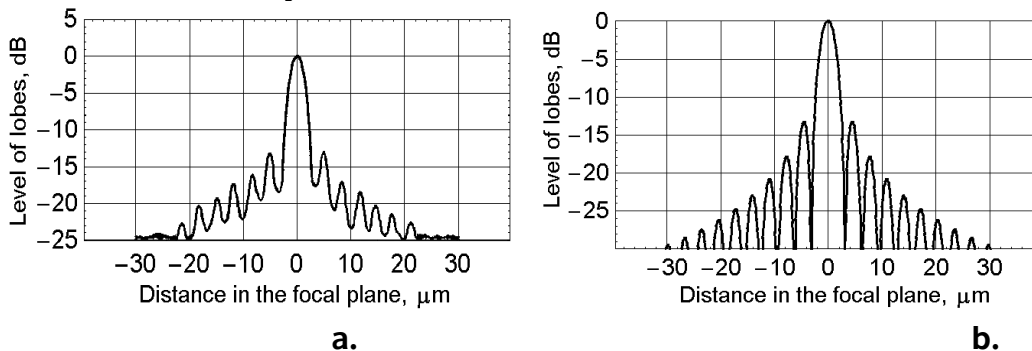


Fig.1. The intensity plots of a spot in focal plane of the integrating lens for a two-phonon light scattering in a TeO<sub>2</sub> optical modulator: (a) experiment, (b) numerical simulation.

### 3.2 AOS, VERSION PARA EL RT5

Los parámetros impuestos por el radiotelescopio, temas y objetos a observar, hacen del espectrómetro acusto-óptico la mejor opción. En resumen se requiere un espectrómetro de alta resolución espectral, económico y escalable.

El cálculo de la resolución espectral ( $\delta v$ ) y el ancho de banda ( $\Delta v$ ) en Hz, usando un cristal de  $\text{TeO}_2$  (con velocidad del sonido de 660 m/s) de 3 X 40mm de ancho y alto en la ventana respectivamente, y considerando un CCD de 3000 pixeles (#CCD) se calcula de la siguiente forma:

$$\delta f = \frac{V_{\text{sonido}}}{L_{\text{cristal}}} = \frac{600 \text{ m/s}}{40 \text{ mm}} = 16 \text{ kHz}$$

$$\Delta f = \frac{\delta f (\# \text{CCD})}{2} = 24.0 \text{ MHz}$$

Estos parámetros se pueden expresar en km/s para 3.9 GHz (76.3 mm). Esto nos da una resolución y ancho de canal equivalentes a:

$$\delta v = (\delta f) (\lambda_0) = 1.23 \text{ km/s}$$

$$\Delta v = (\Delta f) (\lambda_0) = 1824 \text{ km/s}$$

Y, a 43GHz (7mm) es una resolución y ancho de canal equivalentes a:

$$\delta v = 0.1 \text{ km/s}$$

$$\Delta v = 168 \text{ km/s}$$

Estos rangos, cubren de manera suficiente las especificaciones para 43 GHz y su uso para máseres, así como para el caso de 3.9 GHz y las ráfagas solares.

Como ejemplos de montajes mostramos en la FIGURA 5 el diseño del espectrómetro a bordo de SOFIA (Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy). En seguida un diseño posible del montaje en laboratorio para nuestro espectrómetro acusto-óptico implementado con equipo por adquirirse o en existencia.



FIGURA 5. Espectrómetro Acusto-óptico de SOFIA (NASA-ESA)

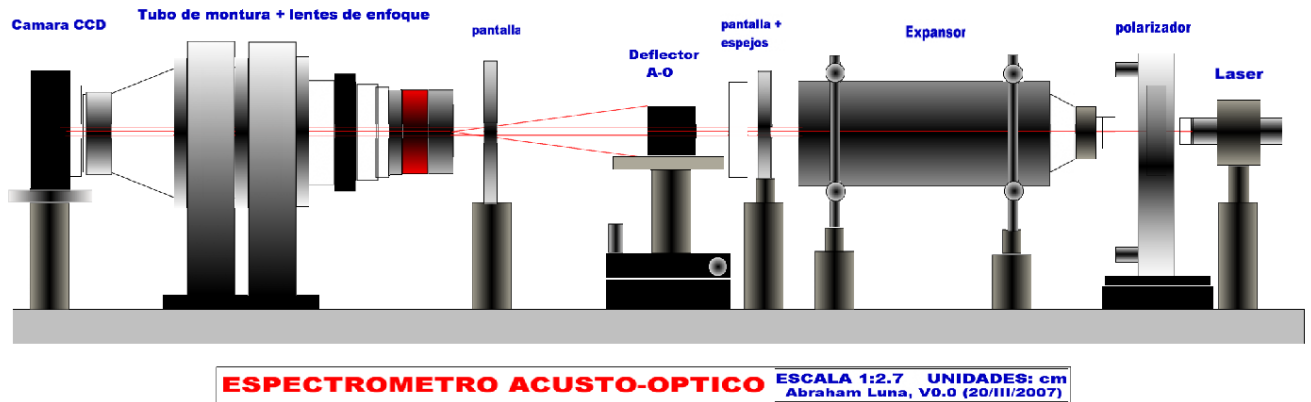
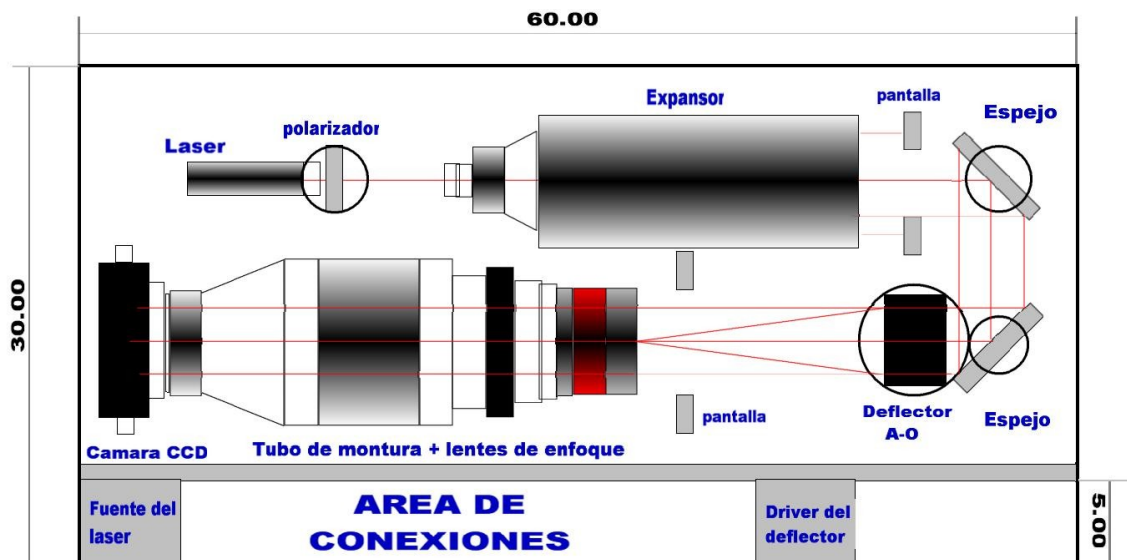


FIGURA 7. Esquema del montaje de laboratorio para demostración del efecto acusto-óptico como espectrómetro.



**ESPECTROMETRO ACUSTO-OPTICO** ESCALA 1:2.7 UNIDADES: cm  
Abraham Luna, V0.0 (20/III/2007)

FIGURA 8. Esquema del montaje para la versión instrumento del espectrómetro acusto-óptico.

#### 4. BIBLIOGRAFIA Y CATALOGOS:

- Cohen R.J., Rep. Progr Phys., 52, 881, 1989.
- Cole, T. W., and Ables, G. J. Astron & Astrophys. Vol. 34, 149, 1974.
- Delgado, G. 1989, "Integración de un espectrómetro acusto-óptico al sistema de un radio telescopio en astronomía milimétrica", tesis de Ingeniería eléctrica, U. de Chile.
- Elitzur, M.,; 1992, Ann. Rev. Astron. Astrophys., 30, 75.
- Hanaoka, Y., PASJ 51, 483, 1999
- Harris, A., 'Heterodyne spectrometers with very wide bandwidths', SPIE vol.4855, 2003
- Hecht, S. optics, Addison Wesley Publishing Company; 3<sup>rd</sup> ed. 2005
- Irvine, W., Carrasco, E., Arexaga, I., editores de " The LMT Book", Septiembre 2005.
- Gómez-Balboa, A.M. and Lepine, J.R.D., Astron. Astrophys.; 1986, 159, 166.
- Kaifu, N., Ukita, N., Chikada, Y., Miyaji T. Publ. Astron. Soc. Japan, VOI- 29, 429, 1997.
- Klein, K.-L. in Advances in Space Research 35, 1759, 2005
- Kristen Rolhfs, 'Tools of radio-astronomy', Springer-Verlag, Springer-Verlag, 2<sup>nd</sup> ed. 1990.
- Lekht, E.E., Mendoza-Torres, J.E., Rudnitskij, G.M., Tolmachev, A.M.; 2001, Astronomy and Astrophysics, V. 376, P. 928-940
- Nyman L-A and Olofsson H.,; 1986, Astron. Astrophys., 158, 67.
- Phillips, R.B., Stranghn, A.H., Doeleman, S.S. and Lonsdale, C.J.; 2003, ApJ (Letters) 588, L105.
- Rudnitskij, G.M., Lekht, E.E., Mendoza-Torres, J.E., Pashchenko, M.I., Berulis, I.I.,; 2000, Astronomy and Astrophys. Suppl. Ser. V. 146, P. 385-395.
- Scaise, Jr. E. 'Espectrometers for radiotelescopes' in Millimeter-wave astronomy: Molecular Chemistry & Physics in space, editors: Wall, W., Carramiñana, A., Carrasco, L. & Goldsmith, P. ASSL, Kluwer Academic Publishers, 1999.
- Schieder R. Siebertz O. Gal C., Olbrich M., Schloeder F., Bieber R.,

Schnuelling F., Tolls V., Horn J. in millimeter and submillimeter detectors for astronomy, Thomas G. Phillips, Jonas Zmuidzinas editors, Proceedings of SPIE Vol. 4855, 2003.

- Shieder in "Instrumentation for submillimeter spectroscopy" Proc. Of the SPIE, ed. Kolberg Eric., Vol. 598, Diciembre 1985.

- Shcherbakov, A., Luna A., Ledeneva, Y. & Maximov, J.; in proceedings of the XXI annual congress of the Sociedad Mexicana de instrumentación; "Principal aspects of design in the acousto-optical spectrum analyzer of radio-astronomic signals for the mexican Large millimeter telescope"; September 2006, in press.

- Shcherbakov, A., Balderas Mata S., Ledeneva, Y., Aguirre Lopez A. "Amplitude and frequency characteristics of a multi-phonon light scattering in tellurium dioxide single crystal" en Proc. SPIE, Vol. 6455, 2007

- Shcherbakov, A., Tepichin, E., Ledeneva, Y. and Aguirre Lopez, A. "Spatial modulators exploiting a multi-phonon light scattering in crystals" En Proc. Of SPIE VOL. 63110A, 2006.

-Tolls, V., Schieder, R., and Winnewisser G. in Proc. 29<sup>th</sup> Liege International Astrophysical Colloquim from Ground-based to Space-borne sub-mm Astronomy, ESA Sp-314, 1990.

#### CATALOGOS:

- Edmund Optics, Optics and Optical Instruments Catalog 2007

- The Newport Resource 2006/2007

- Thorlabs Inc., 2006



## 5. APENDICES

### APENDICE A.

En este apéndice se colecta la información del equipo requerido para el laboratorio y la construcción del espectrómetro acusto-óptico. En verde claro se remarca la mejor opción por precio y calidad anteponiendo en todo caso las especificaciones necesarias para nuestro objetivo.

PROVEDORES CONSULTADOS PARA LA ADQUISICION DE CELDAS ACUSTO-OPTICAS DE TeO<sub>2</sub>.

COMPAÑÍA	DIMENSIONES	V <sub>sonido</sub> (m/s)	COSTO (US DLL)
BRIMBROSE	21 x 3 mm	660	6500+1200 (Driver)
MOLTECH	40 x 3 mm	660	7400

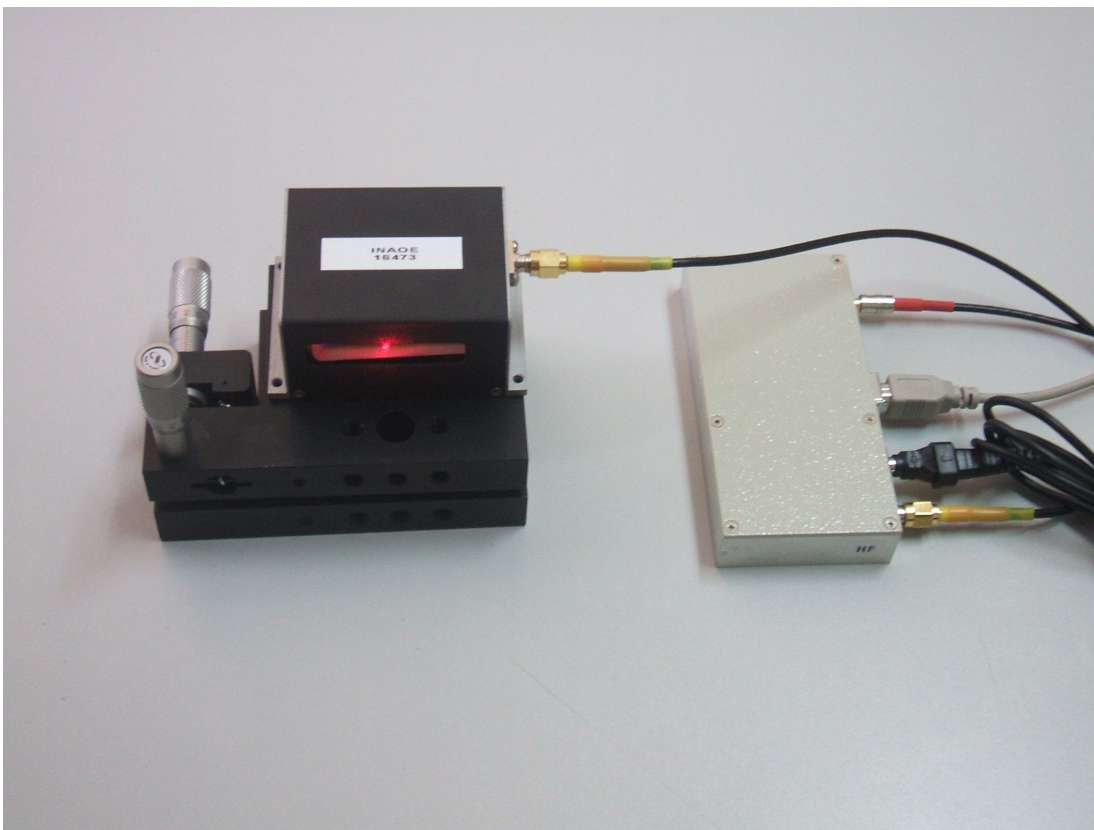


FIGURA 6. Deflector acusto-óptico y controlador en etapa de prueba (el soporte es el elemento 5 (M-36) de la tabla siguiente). Ver en apéndice B, la tabla de especificaciones técnicas.

EQUIPO OPTICO DEL CATALOGO DE NEWPORT Y THORLABS.

Todas las componentes en sistema métrico

#	Cantidad	Descripción	Modelo NEWPORT	Modelo THORLABS
1	1	Oriel linespec CCD Array	78105	-
2	1	High Energy Laser Beam Expander	HB-20X+AR14	BE15M-A
3	1	Precision polarizer rotation mounts	GM-1RA	-
4	1	Scientific Grade Breadboards	M-SG-12-2	PBI11102
5	1	Tilt and rotation platform	M-36	-
6	1	Laser diode Light source modules	LQD635-25E	-
7	1	Laser Power Supply	LPMS-5-110	-
8	1	Cylindrical Laser Mounts	ULM – TILT	C1502/M
9	1	Road clamp	M-340-RC	-
10	1	Universal Mounting plates	M-UP-1A	-
11	1	Short Rod	M-41	-
12	2	Variable Lens Holder	VLH-3A	-
13	2	Pedestal Post	M-PS-0.5	RS05P/M
14	2	Pedestal Post	M-PS-1	RS1P/M
15	2	Pedestal Post	M-PS-2	RS2P/M
16	4	Clamping Fork	PS-F	CF125

SOLO DEL CATALOGO DE THORLABS

#	Cantidad	Descripción	Modelo THORLABS
1	2	Extra large mounting post clamp	C1525/M
2	1	Ultra-stable kinematic 04” mirror mount	KS4
3	1	F-Mount adapter	NFM1LC1
4	1	High precision rotation mount	PR01
5	1	Retaining ring	SM1RR
6	1	25mm XYZ translation stage	PT3/M

DEL CATALOGO DE EDMUNDS 2007

#	Cantidad	Descripción	Modelo EDMUND
1	1	Large format lenses + focus tube mount (F-mount)	M58-495
2	1	Focus tube mounting clamp	M58-502

DEL CATALOGO DE AMES PHOTONICS 2007

#	Cantidad	Descripción	Modelo AMES Photonics
1	1	LARRY-USB, 3000 element CCD, TCDC 7(w)X200(h) micron pixel, Scientific 200-1100nm	D7523
2	1	Software: SpectraSolve	D7403
3	1	Nikon 35 mm lens bayonet mount face plate	D7635

DEL CATALOGO DE BK PRECISION (GADU)

#	Cantidad	Descripción	Modelo BK-PRECISION
1	1	Dipole antenna for 2650	AN302
2	1	Dipole antenna for 2650	AN303
3	1	Dipole antenna for 2650	AN304
4	1	Dipole antenna for 2650	AN305

## APENDICE B.

### Technical specifications of the acousto-optical deflector (AOD) with RF control (Photon – 2202m)

#### 1. Function.

1.1. Acousto-optical deflector (AOD) with RF control intended for controlling of laser beam changing its intensity and spatial position according to RF controlling signal.

1.2. AOD is designed to function in laboratory conditions:

- 1) environmental temperature 15-35°C;
- 2) atmospheric pressure 84 kPa – 106,7 kPa;
- 3) relative air humidity 80% at 20°C.

#### 2. Complete set.

Complete set consists of optical frame, RF-driver, cables, demonstration software.

#### 3. Technical specifications of the acousto-optical crystal – TeO<sub>2</sub>.

PARAMETER	VALUE
Light wavelength	633 nm
Controlling frequency band	50 – 90 MHz
Actual optical aperture	4x40 mm
Sound wave velocity	650 m/s
Optical beam scanning angle (in air)	2,25°
Optical radiation transmitting coefficient	0,95
Diffraction efficiency at controlling frequency band	60 – 90 %
VSWR	< 2,8
Maximal power of RF controlling signal (time averaged)	1 W
Impedance	50 Ohm
Polarization of incident polarized optical beam	Polarization plane is parallel to the base plane of optical block
Polarization of diffracted beam	Polarization plane is orthogonal to the base plane of optical block
Reflection coefficient of AR coating	< 0.7 %
RF-driver	operates by the keyboard of IBM PC through USB-2 port
Maximum switching time	10 <sup>-3</sup> sec
Minimum frequency step	1 Hz
RF-driver	can be adjusted by a random step in working frequency band
Maximum RF-driver output power	1,4 W

Demonstration software allows controlling of the following parameters (with the PC keyboard): start and end frequency values, frequency step, output power of the controlling signal.

#### 4. Safety instructions.

4.1. Read the user's manual carefully before starting work with AOD.

4.2. The value of RF-controlling power, averaged by time should not be higher than 1.0 W:

for example, in a case of continuous controlling signal  $P_{con} < 1.0$  W, in a case of periodic impulses  $P_{imp}/N < 1.0$  W, where  $P_{con}$  - power of continuous signal,  $P_{imp}$  - power of signal in one impulse,  $N = T/t$ ,  $t$  - impulse time,  $T$  - period of impulses repetition.

#### 5. The rules for handling and storage.

5.1. AOD can be transported by any kind of roofed transport.

5.2. Acousto-optical deflector (AOD) with RF-control should be stored cased in heated ventilated places at temperatures 5-40°C and relative air humidity not exceeding 80% at 20°C.

5.3. Air in the places where AOD is stored should not consist any harmful contaminants, leading to the corrosion.

## **Technical description and user's manual Acousto-optical deflector with RF control (AOD)**

### 1. Technical description

#### *1.1. Design and functionality of AOD*

1.1.1. AOD equipment set consists of optical block, RF controlling unit (RF driver), cables and disk with demonstrational program for controlling of deflector parameters.

1.1.2. Optical block of AOD consists of the metallic case (dimensions 76x53x35 mm), where the acousto-optical cell is placed. Acousto-optical cell consists of acousto-optical medium ( $\text{TeO}_2$  single crystal) with attached piezotransducer ( $\text{LiNbO}_3$ ) and sound absorber (In), and electrical matching circuit. Optical block is equipped with RF-connector for input of controlling RF signal and two optical windows for input and output optical radiation. The base of optical block has four mounting holes.

1.1.3. AOD RF-driver is a metal case with dimensions 110x54x18 mm, where direct frequency synthesizer (working frequency band 50-90 MHz) and power amplifier are placed. RF-driver is equipped with four connectors: SMA-type RF connector for connection with optical block; USB connector for connection with PC; DC power connector (+5 V) for connection of power adapter AC 220

V 50Hz (included); SMB-type Mod connector for connection of power modulation video signal generator for pulse mode operation of AOD. Video pulses voltage is +(2.5-3.5) V. In case of continuous operation mode a constant voltage +(2.5-3.5) V should be supplied on the Mod connector. Another way of providing continuous mode operation is described in 1.3.7 (external modulation mode with inversed polarity).

1.1.4. AOD functioning principles are based on acousto-optical phenomena. Variable electric field (controlling signal) applied to the piezotransducer excites the ultrasound wave propagating in TeO<sub>2</sub> prism, causing the periodical disturbance of refraction coefficient and forming the phase diffraction grating in the medium. That leads to the grating diffraction of light, propagating in the crystal with the certain angle and certain state of polarization. The polarization of diffracted light becomes orthogonal to the polarization of incident light so that diffracted and incident light diverge by an angle  $\Delta$ . The value of this angle (in air) is approximately defined by the equation:

$$\operatorname{tg} \Delta = f \times \lambda / V,$$

(1)

where  $f$  is controlling frequency,  $\lambda = 632.8$  nm – light wavelength in vacuum,  $V = 650$  m/sec – sound velocity in crystal.

For central working frequency (70 MHz) the value of this angle  $\Delta = 3.9^\circ$ , and the value of diffracted light scanning angle in air for working frequency band (50 – 90) MHz is  $2.25^\circ$ . Due to the construction of AOD incident light beam should be orthogonal to the entrance optical plane of the cell, and the light polarization plane should be parallel to the base of optical block. This construction type provides the maximum scanning angle value.

1.1.5. Modulation of filtered light intensity is provided by the modulation of electrical power of controlling signal.

1.1.6. Demonstrational software is a control program for RF-driver parameters management. The controlling is provided through the usual PC with Windows operating system (version 98 or later). Demonstration software has user-friendly interface and intuitive menu. Active program has two panels:

- 1) Panel «Device open» is the starting panel. It contains attached to the PC AOD drivers list with their signatures and serial numbers.
- 2) Panel of frequency scanning parameters. This panel opens from «Device open» panel by pressing of the «Sweep frequency» button. To return to previous panel press «Dev OPEN» button.

List of programmable parameters.

1. Modulation mode (choose by pressing menu buttons («external» or «internal»).

1.1. Internal modulation mode (driver's built-in rectangle pulses generator). In this regime the value of RF pulse duration  $t$  is equal to  $T/2$ , where  $T$  is a period of impulses repetition. Modulation pulses repetition rate is defined by

the value of scaling multiplier («prescaler») and inner timer, shown on the screen in Hz. Maximum value of internal modulation frequency is 1.5 kHz.

1.2. External modulation mode. External rectangle pulses generator should be attached to AOD's RF-driver Mod connector by the included cable. Modulation pulses amplitude should be + (2.5 – 3.5) V.

1.2.1. Direct polarity mode (choose by pressing of corresponding button in menu). During the modulation pulse the RF-power signal is present at the RF output. At the zero-input of modulation impulse there is no power at the RF-output. Minimal duration of modulation pulse is 100 ms, minimal pause duration is 200 ms, and maximum repetition rate is 3 kHz.

1.2.2. Inversed polarity mode (choose by pressing of corresponding button in menu). During the modulation pulse there is no power at the RF-output. Power is present at the RF output during the modulation pulse. Minimal duration of modulation pulse is 200 ms, minimal pause duration is 100 ms, and maximum repetition rate is 3 kHz.

2. Starting frequency value (in Hz). Enter value of frequency in the window "Start frequency". The working frequency band: (50–90) MHz.

3. Frequency step (in Hz). Enter value of step in the window "Frequency step". Minimal frequency step is 1 Hz.

4. Number of frequency steps (in relative units). Enter value in the window "Number of steps". Range: 0 – 65536.

5. Power parameter (in relative units) is proportional to RF output power. Enter value in the window "Power". Range: 0 – 1023.

Linear sweep mode can be also provided by the program. The exposure time of the frequency point is equal to RF-driver output pulse duration, i.e. frequency switching take place in pauses between RF-driver output pulses. The particular case of the linear sweep mode is the mode of "frequency point", when the starting frequency is set and the value of frequency step is zero.

## 2. User manual

### **2.1. Safety precautions**

2.1.1. **Attention!** To avoid the damage of piezotransducer the value of averaged by time RF-controlling power should not be higher than 1.0 W; i.e. in a case of continuous controlling signal  $P_{con} < 1.0$  W, in a case of periodic impulses  $P_{imp}/N < 1.0$  W, where  $P_{con}$  - power of continuous signal,  $P_{imp}$  – power of signal in one impulse,  $N = T/t$ ,  $t$  – impulse time,  $T$  – period of impulses repetition.

2.1.2. **Attention!** To avoid the damage of RF-driver the polarity of external modulating pulses should be strictly observed (+) and their amplitude should not exceed 3.5 V.

### *2.2. Operation procedure*

2.2.1. Place and fix the AOD optical block into the light path. If RF-connector of the optical block is in front of the operator, then light should come from the right.

2.2.2. Orientate the AOD optical block so that light beam should be incident in the center of the optical window of the crystal and orthogonal to the crystal plane. Undiffracted light beam should come out from the back optical window of crystal having an angle to direction of incident beam (angle direction “from operator”).

2.2.3. Using the included cables connect AOD optical block with RF-driver; than connect RF-driver with modulation pulses generator (for external modulation mode) and AC power adapter, which should be connected to DC 220V 50Hz. Connect RF-driver to USB port of your computer using the included cable.

2.2.4. Set the controlling signal according 2.2.5 – 2.2.8. Controlling signal frequency should be chosen according to 1.1.4, and it’s power – according to 2.1.1. The diffraction beam should appear, diverged “to operator” in optical block base plane (according to 2.2.1).

2.2.5. Turn on your PC and load the OS. Provide the “New device installation” procedure (Plug and Play). Specify the path to driver’s files, if asked (DRV directory). The “New device installation” procedure required only once.

2.2.6. Start the program “kaa1.exe”. Panel “Device open” should appear with the list of AOD drivers (for our case – only one driver). Press the “Refresh” button. Choose and select with mouse cursor the device for work. Press the “Open” button. The message indicating connection the device to PC should appear in the right upper corner of the panel. The value of output power of AOD RF-driver is equal to zero in this mode (if external modulation pulses are absent), because the mode of external modulation with the direct polarity is set by default.

2.2.7. Choose the mode and modulation parameters ( see 1.1.6).

2.2.8. Open the panel of frequency sweep parameters by pressing the “Sweep frequency” button. Set the frequency sweep parameters in corresponding menu windows. Press the “Sweep start” button. After that the first modulation pulse will provide the RF-driver power output pulse with carrier frequency specified as “Start frequency”. Second modulation pulse will provide power output pulse with carrier frequency increased by one step, etc. After all steps specified in menu will occur, program will return to start frequency and loop. Calculating (by any means) the quantity of pulses transmitted after the start modulation, you can get the current value of carrying frequency  $f$  and, using the equation (1), get the current value of scanning angle of light beam with wavelength  $\lambda$ .



For turning off RF-driver output power in selected mode you should have the external modulation mode with the direct polarity without applying the modulation pulses.

For the change of working mode you should open the panel of sweeping frequency parameters, enter new values and press the "Sweep start" button.

2.2.9. With the additional adjustment of AOD optical block placing in the optical path you should achieve maximum diffraction light intensity and maximum flatness of optical radiation by both optical aperture and frequency band.

2.2.10. Turning the device off:

- 1) Open the main panel by pressing button "Dev OPEN".
- 2) Press the "Close" button (the message about disconnection the device from the PC should appear in the right upper corner of the panel).
- 3) Close program.
- 4) Disconnect the USB cable.
- 5) Disconnect the power adapter.
- 6) Disconnect AOD optical block from AOD RF-driver.

## **ANALIZADOR DE ESPECTROS.**

El analizador de espectros que utilizaremos es un **BK PRECISION 2650** las características fundamentales de este son las siguientes:

- Rango de frecuencia de 50kHz a 3.3GHz.  
(+/- 30+100Tsweep) kHz +/-1dot para 200kHz-10MHz  
(+/- 30+100Tsweep) kHz +/-1dot para 20MHz-3.3GHz
- Rango de despliegue en frecuencia: de 200 kHz. A 2GHz en tres pasos y 3.3 GHz (full span).
- Resolución de Ancho de Banda (RBW), 3dB  
con anchos de banda de 3 kHz a 3 MHz (+-20%)
- Ancho de Banda de video (VBW), de 100 Hz a 1 MHz.
- Tiempo de Barrido (SWEEP), de 10ms a 30s.
- Impedancia de entrada 50Ω  
Max. Potencia de entrada 20dbm, 25VDC
- Comunicación a una PC, por medio de software (AK2650),  
por el -puerto RS-232, interfaz de 2400 a 38400bps.
- Nivel de Referencia: +10 a -60 dBm (1dB por división)  
+/-0.8dB+/-1dot



Figura 1.- BK PRECISION, modelo 2650. Sin antena.

Este modelo cuenta con una antena MOD 301, omnidireccional, con rango de operación en 0.8 a 1 GHz, el cual pesa 20grm (que nos servirá para la caracterización práctica de la antena). La siguiente figura, muestra el patrón de campo en el plano E y la ventana de la antena.

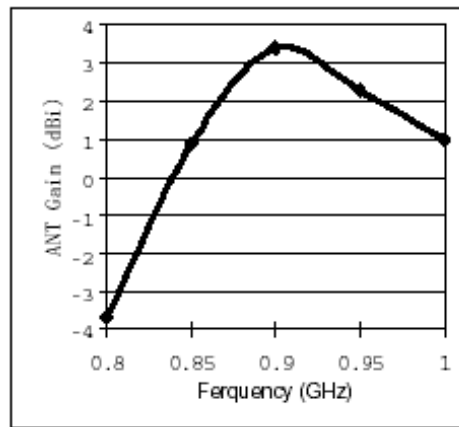
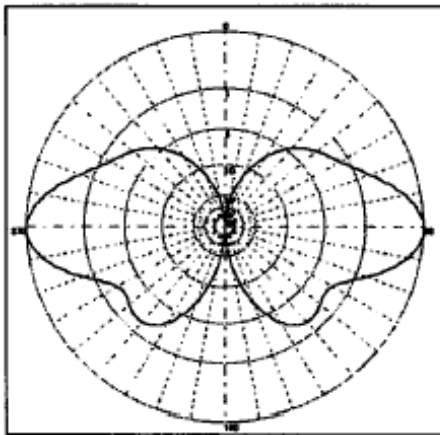


Figura.- Patrón de campo en el plano E y la ventana de la antena

**AGRADECIMIENTOS:**

Los autores agradecen a los proyectos CONACYT 42609-F, 42577-F, financiamiento parcial para esta etapa del proyecto.