

Diseño y construcción de un espectrógrafo alimentado con fibra óptica para ciencia básica en el Observatorio del Teide

Adrián Hernández García

Máster en Astrofísica - Universidad de La Laguna

Supervisado por:

Félix Gracia Temich & Carlos Allende Prieto

Instituto de Astrofísica de Canarias

Abstract

Este proyecto consiste en llevar a la práctica la idea de que el IAC construye los instrumentos con los que observa. Como proyecto universitario se pretende comprobar los detallados conocimientos que debe poseer el alumnado, en cuanto a diseño y fabricación de instrumentación astronómica; así como por supuesto la exposición del caso científico y la justificación técnica de las especificaciones. Este diseño de espectrógrafo en particular pretende incluir la sencillez de un sistema con una única rendija y las complicaciones de utilizar múltiples fibras ópticas para guiar el haz de luz desde el foco del telescopio al instrumento principal. El haz de luz atraviesa un conjunto circular de siete fibras ópticas, para llegar al colimador alineadas perpendicularmente a la rendija, consiguiendo siete espectros de las correspondientes fibras tras atravesar una única red de difracción y tras salir por una conexión estándar. Todo esto para ser observable fácilmente por la mayoría de sensores del mercado y de uso común por estudiantes y profesores universitarios. Con esto pretendemos llamar la atención de los usuarios del Observatorio del Teide que pudieran beneficiarse de un pequeño espectroscopio en su trabajo. Sobre todo cuando los conocimientos que envuelven este tipo de trabajo instrumental son materia común para la gran mayoría de alumnado que participa en los Observatorios de Canarias del IAC.

ÍNDICE ¹

Abstract	1
Resumen / Summary	4
Introducción general	6
Objetivos	8
Objetivos científicos	8
Objetivos Técnicos	8
Adaptabilidad	8
Fibras Ópticas	8
Versatilidad	8
Calibración	8
Específicos	9
Reutilización de ópticas	9
Adaptación a telescopios portátiles y de divulgación	9
Fácil replicación	9
Justificación	10
Metodología	11
Trabajo en el laboratorio de óptica del IAC	11
Materiales iniciales	11
Diseño Óptico del Espectrógrafo	12
Partes del espectrógrafo	13
Entrada del array de fibras	13
Lente de colimación	14
Elemento dispersivo	15
Lente de cámara	15
Detectores	15
Lámparas de calibración	16

¹ Estructura modificada con respecto a la de los artículos científicos, dada la naturaleza instrumental del trabajo.

Resultados técnicos	17
Foco final del sistema	17
Compatibilidad del diseño óptico	18
Sensibilidad	19
Escala del telescopio (resolución espacial)	19
Rango espectral	19
Resolución espectral total limitada por difracción	19
Resolución espectral ($\Delta\lambda$)	20
Resolución espectral en el sensor	20
Calibración de los primeros espectros de laboratorio	21
Conclusiones	24
Lista de Figuras	24
Lista de Tablas	25
Bibliografía	25
Agradecimientos	25



1. Resumen / Summary²

Astronomy is the scientific discipline that studies celestial objects. Unlike other branches of science, a sample cannot be studied in the laboratory, which leads to the use and creation of remote detection and tracking techniques, to be able to unravel the processes that occur there, only with the light that we collect.

Spectroscopy is the study of the interaction between radiation and matter. It is possible to study these interactions thanks to the energy absorption and emission processes present in these interactions.

Although it took centuries since **Fraunhofer** discovered the first spectral lines until the technique was refined, today it is a common technique in most scientific studies. It is particularly useful in astronomy since it allows obtaining the physicochemical properties of the objects studied without having to have them in the laboratory. From the chemical abundances of stellar populations, the interstellar medium or the evolution of galaxies; to the relative movements of multiple stellar systems, galactic clusters or the presence and magnitude of exoplanets.

With these **spectroscopy techniques** we can easily find the energy of atomic, molecular and even nuclear interactions. From the most subtle to the most powerful energy processes in the universe.

In **optical astronomy** we work restricted to the visible spectrum and part of the near infrared available in some observatories, with which we can fine-tune the instrumentation to achieve simple spectroscopes specialized in this band.

The **Master of Astrophysics** at the University of La Laguna prepares us in the common and most relevant subjects in astronomy and astrophysics at an international level. It also teaches us the most detailed astronomical image analysis tools, with specialized software and methodical techniques for a better understanding of the cosmos.

However, what concerns us here is the presentation of a report that evaluates me. **We are asked to** "apply the conceptual schemes acquired in Astrophysics to carry out an original research work, where by ourselves we find solutions to specific astrophysical problems using specific bibliography and with minimal supervision".

This project puts into practice the idea that "IAC builds the instruments with which it observes". We pretend to **demonstrate** in this university project all concepts learnt on the Master degree, at least in terms of astronomical instrumentation design. Of course it will be necessary to expose the **scientific case** and technical **justification** related to all specifications of the fiber-fed spectrograph. Particularly this design should include simplicity as a key, starting from the standard design of the classical long-slit but complicated with a multiple fiber-fed acquirer.

² Punto 9.3 de la Guía Docente del Trabajo Fin de Máster: "Deberá contar con un resumen de al menos 1000 palabras en el idioma que no se use (inglés o español) en el resto de la memoria".

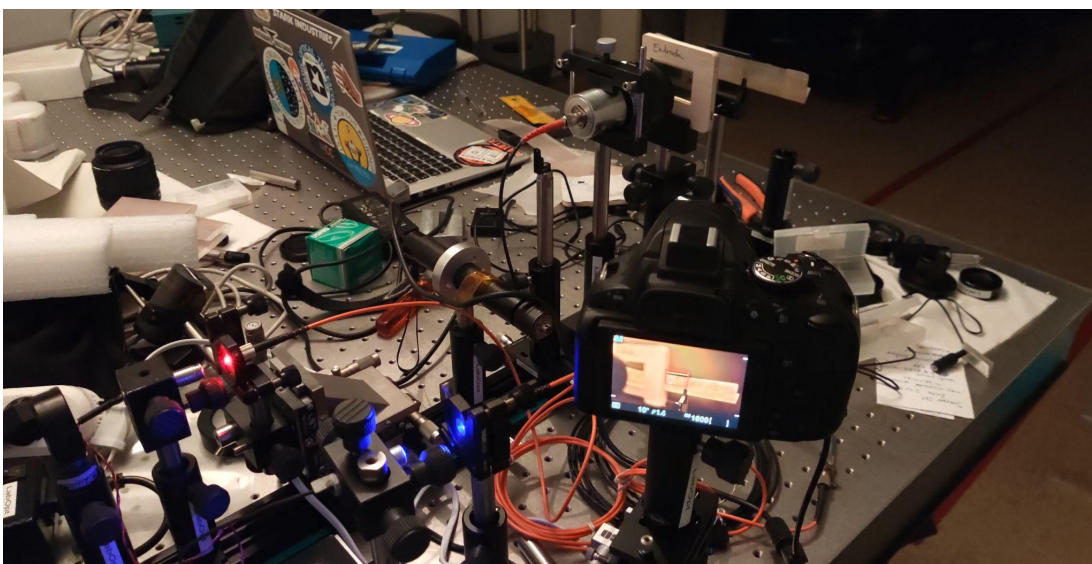
The **array** of 7 fibers is disposed in a circular shape in order to take light from the object and its surroundings and in the outer end will be arranged in a line in order to simulate a long-slit and obtain spectra in a classical way. Those 7 spectra would be saved in any kind of commercial cameras, thanks to a standard mechanical connection and also covering a wide range of compatible focal ratios for almost any kind of telescope on the Canary Islands Observatories. As a basic spectrograph most **students coming to the Teide Observatory** will have an opportunity to use this instrument for their studies on most branches of astrophysics.

Thanks to the capabilities of the IAC's Optical Laboratory this project had an opportunity to develop the instrument, also instead of the COVID pandemic. There we were surrounded by all kind of lenses, adaptors, cameras and much more. As soon as possible the design was established and using a transmission grating and the fibers array was almost finished.

Due to my own objective, we want to make it simple, affordable and applicable both for most telescopes of Canary Islands Observatories and for almost any kind of commercial cameras thanks to wider optics than necessary and to standard adaptors respectively. We tried to reuse common photographic objectives from the Laboratory and promote the use of standard commercial components and used materials.

As a spectrograph, we needed to test different kinds of calibration lights, those with which we can obtain a controlled spectrum to calibrate those obtained with the instrument. The Laboratory had Thorium, Iron, Helium and so many other lamps with different power sources and connectors. But the first step in the Lab was to prepare the optical bench and fix the optical axes. After setting the first set of lenses we started the test images on the available Nikon camera. We tested the sensibility of the camera with a continuum source and later the different available fibers from the continuum source and the lamps.

This instrument should be representative of those made by students, as well those done to produce basic science at university degrees. In the same way, this kind of project would make pace for more instruments of its class, helping to the basic science done at Teide Observatory for more than students, becoming a fully available instrument for almost all users, levels and telescopes.



2. Introducción general

La **astronomía** es la disciplina científica que estudia los objetos celestes. A diferencia de otras ramas de la ciencia no se puede estudiar una muestra en laboratorio, lo que lleva al uso y creación de técnicas de detección y rastreo a distancia, para ser capaces de desentrañar los procesos que allí ocurren, sólo con la luz que nos llega.

La **espectroscopía** es el estudio de la interacción entre la radiación y la materia. Es posible estudiar estas interacciones gracias a los procesos de absorción y emisión de energía presentes en dichas interacciones.

Aunque se tardó siglos desde que **Fraunhofer** descubriese las primeras líneas espectrales hasta que se depurase la técnica, hoy día es una técnica habitual en la mayoría de estudios científicos. Es particularmente útil en astronomía dado que permite obtener las propiedades físico-químicas de los objetos estudiados sin necesidad de tenerlos en laboratorio. Desde las abundancias químicas de poblaciones estelares, el medio interestelar o la evolución de las galaxias; hasta los movimientos relativos de sistemas múltiples estelares, cúmulos galácticos o la presencia y magnitud de exoplanetas.

Con estas técnicas de espectroscopía podemos hallar fácilmente la energía de las interacciones atómicas, moleculares e incluso nucleares. Desde las más sutiles hasta los procesos energéticos más potentes del universo.



Fig.1: Ilustración acerca de Joseph von Fraunhofer en la reedición de la serie *COSMOS: A Spacetime Odyssey*, de 2014



Fig.2: Edificio de Física y Matemáticas de la ULL

En **astronomía óptica** trabajamos restringidos al espectro visible y parte del infrarrojo cercano disponible en algunos observatorios, con lo que podemos afinar la instrumentación para conseguir sencillos espectroscopios especializados en esta banda.

El Máster de Astrofísica de la Universidad de La Laguna nos prepara en las materias comunes y más relevantes en astronomía y astrofísica a nivel internacional. Además nos enseña las herramientas de análisis de las imágenes astronómicas más detalladas, con software especializado y técnicas metódicas para la mejor comprensión del cosmos.

Sin embargo, lo que aquí nos atañe es la presentación de una memoria que me evalúe como alumno. Se nos pide *‘aplicar los esquemas conceptuales adquiridos en Astrofísica para realizar un trabajo de investigación original, donde por nosotros mismos encontremos soluciones a problemas astrofísicos concretos utilizando bibliografía específica y con una mínima supervisión’*. A partir de ahora voy a desglosar en los siguientes apartados: cómo, cuándo y con quién he desarrollado un diseño de espectroscopio óptico para astronomía. Ésto compete desde todas las ramas de ciencia básica que se pretende hacer con el mismo, hasta los detalles más complejos en la precisión de las lentes utilizadas, pasando por los requerimientos extra *motu proprio* que hemos convenido considerar.

Fruto de la siempre presente colaboración interdepartamental del IAC, se recogen aquí muchísimos detalles específicos del responsable técnico de la revisión del instrumento y las pruebas del mismo, el experto en óptica Félix Gracia; así como diversas consideraciones científicas adaptadas a las particularidades del instrumento gracias al investigador Carlos Allende.



Fig.3: Observatorio del Teide, con un instrumento del alumno para pruebas de observación en microondas en otro trabajo.

Así hablamos de un instrumento que aunque está diseñado para realizar ciencia base, toca tecnologías de vanguardia como los enlaces de fibra óptica y estará disponible para los educadores y estudiantes de los Observatorios de Canarias; además de ser fácilmente replicable en la mayor parte de su diseño y componentes utilizados.

Este instrumento se enmarca dentro del proyecto de fabricación y capacitación de un próximo telescopio de 40cm para el Observatorio del Teide (OT en adelante), con nombre en clave “T40”.

3. Objetivos

Este trabajo tiene definidos sus objetivos, aunque bien separados en diferentes categorías:

3.1. Objetivos científicos

Nuestros objetivos científicos para el proyecto deben poder responder a la mayoría de planes de estudio de las diferentes universidades que realizan sus prácticas en el OT o en el Observatorio del Roque de los Muchachos en la isla de La Palma. Esto se puede reducir con facilidad a los estudios del presente máster de astrofísica, que recopilan la mayoría de técnicas y campos de estudio, al igual que lo hace las líneas de investigación del IAC.

En los casos más habituales de ciencia básica como caracterizar tipos espectrales de estrellas, poblaciones estelares de cúmulos o galaxias, así como algunas abundancias químicas del medio interestelar; lo que nos va a limitar el estudio de unos u otros objetos será el poder de resolución espacial del telescopio. Es decir, si podremos o no meter en una o más de nuestras fibras las diferentes fuentes de estudio. Para ello necesitamos saber qué escala de placa presenta el T40 y así saber qué tamaño angular podrá entrar en nuestras fibras ópticas de 80 μm de diámetro (0.08 mm).

3.2. Objetivos Técnicos

Entre los objetivos técnicos enmarcamos las diferencias clave de este proyecto respecto a la mayoría de instrumentos similares. Claramente nos referimos a:

3.2.1. Adaptabilidad

Uno de los objetivos más importantes del proyecto es la reutilización de los materiales disponibles en el laboratorio de óptica del IAC. A su vez se pretende minimizar los costes en la fabricación de este tipo de instrumentos, que son sencillos a la par que de gran importancia para la ciencia de base.

3.2.2. Fibras Ópticas

Como parte de los materiales de relevancia para el proyecto, se dispone de una serie de fibras ópticas con las que aligerar el peso del instrumento en el telescopio y a la vez sustituir el uso de la habitual rendija, por la disposición del array de fibras a modo de falsa rendija.

3.2.3. Versatilidad

El instrumento debe poder ajustarse a la mayor parte de estudios de base en espectroscopía de diferentes niveles de estudio y lugares de origen, y también adaptarse a las necesidades de la mayoría de usuarios habituales y visitantes del OT, así como se pretende extrapolar el concepto a más telescopios.

3.2.4. Calibración

Este Trabajo Fin de Máster requiere además del diseño conceptual del instrumento, la calibración de los componentes del mismo, a modo de validación inicial; así como por la evaluación del TFM. En su fase final podría llegar a fabricarse en impresora 3D un prototipo final del mismo, o incluso construir uno junto con el Departamento de Mecánica del IAC para ser probado en el OT o en el mismo T40 en caso de finalizar su construcción.

3.3. Específicos

Los objetivos científicos y técnicos del proyecto eran compatibles con una serie de objetivos personales, fácilmente incorporables sin mayor dificultad. Con ellos también se pretende cumplir ciertas necesidades para los usuarios habituales del OT, sobre todo estudiantes y profesores. Aunque algunos objetivos son comunes también para aficionados y visitantes del observatorio y todos comparten una filosofía de sostenibilidad del propio proyecto e incluso del medio ambiente:

3.3.1. Reutilización de ópticas

Como a la hora de fabricar un espectrógrafo no se requiere de muchos elementos ópticos, una gran alternativa a las lentes simples de laboratorio son los objetivos fotográficos comerciales. Su calidad generalmente no es mala y suelen ser mejores opciones que las lentes simples por sus menores aberraciones y por tanto su mejor calidad de imagen. Suelen estar bien corregidas de cromatismo, al menos en el rango visible y suelen ofrecer gran apertura focal, haciéndolos aún más versátiles.

Con ello, además de darle salida a viejas ópticas en desuso de entre el material del IAC, se persigue un espíritu de reutilización y reciclaje propio de los tiempos que corren donde el combate al cambio climático y sus paliativos están a la orden del día.

3.3.2. Adaptación a telescopios portátiles y de divulgación

El telescopio T40 parece que será un telescopio sencillo para las pruebas de instrumentación a realizar in situ en el OT. Con su ratio focal $f/10$, hablamos de una configuración óptica habitual tanto en telescopios profesionales de Observatorios como en los más habituales telescopios pequeños utilizados por aficionados y estudiantes, tanto portátiles como fijos.

Los aficionados a la astronomía y la astrofotografía estamos familiarizados con una serie de adaptadores para cámaras o incluso sistemas informáticos completos para el autoguiado. Además han perdurado una serie de estándares de roscas y acoples, al margen de las principales marcas comerciales.

En este proyecto buscamos sustituir la idea de tener sensores fijos. Hemos previsto adaptar en las salidas principal y secundarias una serie de roscas mecánicas con enganche para oculares estándar, con los que facilitar el uso del instrumento por parte de cualquier propietario de la gran mayoría de cámaras y oculares del mercado. Tanto para el sensor principal donde obtenemos los espectros, como para el sensor secundario de apuntado y posicionamiento de las fibras.

Si además desde el IAC o la administración del OT se prevee tener una serie de accesorios del proyecto para uso propio del IAC, tales como cámaras principal y de autoguiado y accesorios; el instrumento estaría disponible con facilidad para cualquier usuario habitual del OT.

3.3.3. Fácil replicación

Tanto por la sencillez del diseño como por la reutilización de materiales, es fácil extrapolar este proyecto a uno cuya replicación sea no sólo fácil, sino parte esencial del diseño. A la hora de elegir cualquiera de los elementos ópticos, que serán comerciales en la medida de lo posible, también buscaremos los más habituales para estar descartados de los sets de trabajo tanto de fotógrafos como aficionados. De igual manera, con la utilización de elementos estándar como se prevee en el apartado anterior, este sencillo instrumento pretende ser lo más fácilmente replicable posible.

3.4. Justificación

El instrumento se debe ajustar al proyecto del telescopio T40. También se pretende poder usar el mismo en otros telescopios. Además de poder exportarlo fácilmente a telescopios portátiles de similar tamaño y características como hemos previsto desde el inicio; hemos procurado que las propiedades ópticas del sistema sean compatibles con la mayoría de telescopios disponibles del OT.

Nosotros trabajamos con un haz de luz con razón focal $f/10$, donde el elemento más limitante es nuestra lente colimadora (28mm $f/2.8$); que elegimos expresamente para ser compatible con telescopios de razones focales menores, hasta $f/4$ sin ningún viñeteo ni otras pérdidas de luminosidad del telescopio. En los telescopios habituales del OT como el IAC80 ($f/11.3$), TCS ($f/13.8$) así como el telescopio MONS de divulgación ($f/15$), podemos trabajar en las estaciones focales cassegrain sin pérdidas.

Además, gracias a la utilización del enlace de fibras ópticas, el proceso de instalación y uso del instrumento debe ser estándar para casi cualquier telescopio mientras sea posible el acople del sistema de adquisición.

Por todo esto entendemos que este tipo de proyectos de instrumentación no son sólo útiles para los usuarios habituales del OT, sino que son toda una apuesta clara por la flexibilidad en cuanto a la toma de datos par ciencia básica, con más ahínco aún dado el carácter académico del instrumento siendo el OT uno de los observatorios de referencia internacional en enseñanza de astrofísica así como el IAC un claro desarrollador de instrumentación.

4. Metodología

Para empezar a trabajar en el diseño, tuvimos en cuenta una serie de requerimientos mínimos de diseño, los materiales de los que disponíamos y los protocolos de trabajo específicos.

4.1. Trabajo en el laboratorio de óptica del IAC

Trabajar en el laboratorio de óptica del IAC requiere de una serie de credenciales de acceso personales que se consiguen a través del Jefe del Departamento de Óptica, José Luis Rasilla. Así los alumnos de la ULL podemos acceder al recinto del IAC, cumpliendo con todas las medidas anti-COVID; y con las credenciales personales acceder también al propio Laboratorio de Óptica.

Allí además del especial ambiente de trabajo, lleno de bancos ópticos de múltiples proyectos de investigación e instrumentación; tuve la suerte de tener a disposición a Aitor Torres, el responsable técnico del laboratorio. Su ayuda a la hora de entender los materiales disponibles y cómo usar algunos de ellos es sólo comparable a la que recibí por parte de otros investigadores y del tutor Félix, que además proporcionaba a menudo sus propias soluciones materiales.

4.1.1. Materiales iniciales

Como hemos mencionado, el proyecto parte de la idea de que se utilicen los recursos ya existentes en los diferentes departamentos del IAC, minimizando los recursos extra. Esta decisión se toma ya no sólo por razones económicas en cuanto a tiempo y dinero, sino embebidos en una filosofía de trabajo regida por la facilidad de construcción, replicabilidad, así como sostenibilidad medioambiental y del propio instrumento; minimizando con ello las necesidades de mantenimientos nuevos y específicos, más allá de los habituales en los materiales comerciales que utilizemos.

Se detalla la utilización de los siguientes materiales principales durante el presente trabajo, así como su reemplazo final en el diseño en tal caso:

Tabla 1: Materiales iniciales del proyecto

	Material inicial	Propósito general	Situación tras el trabajo
1	Fuente de luz	Simular el objeto de estudio	Reemplazado por el telescopio final
2	Lentes del laboratorio	Definir el haz y el aumento	Se han elegido algunos para estar definitivamente en el instrumento, devolviendo los sobrantes al laboratorio y requiriendo su sustitución en el mismo
3	Redes de difracción	Dispersar el haz de luz	
4	Fibras ópticas	Llevar la luz desde la fuente / telescopio al instrumento	
5	Lámparas de calibración	Mostrar a placer un espectro conocido para calibración	
6	Estructura del instrumento (banco óptico de trabajo)	Soportar cargas mecánicas de los elementos ópticos	A fabricar expresamente para el instrumento, en impresora 3D
7	Adquisidor	Apuntado y autoguiado	

			o en el Taller de Mecánica
8	Cámara (Nikon D5100)	Obtener imágenes de los espectros para su estudio	Se requiere del usuario final, aunque se podrá usar cualquiera comercial por la versatilidad del sistema óptico y mecánico
9	Ordenador de análisis	Realizar la reducción o calibración de los espectros	

4.2. Diseño Óptico del Espectrógrafo

Cuando pretendemos redirigir la luz captada en el telescopio hacia el instrumento, solemos utilizar una combinación de lentes y espejos con los que conformar el camino óptico principal. Como nuestro diseño incorpora una guía mediante fibras ópticas, podremos distinguir 2 partes del diseño:

- El Adquisidor del instrumento donde se obtiene la luz de nuestro objeto y se inserta en las fibras ópticas.
- El Espectrógrafo donde recibimos el haz de luz de las fibras y tras dispersarlo en la red procedemos a enfocararlo en nuestro sensor.

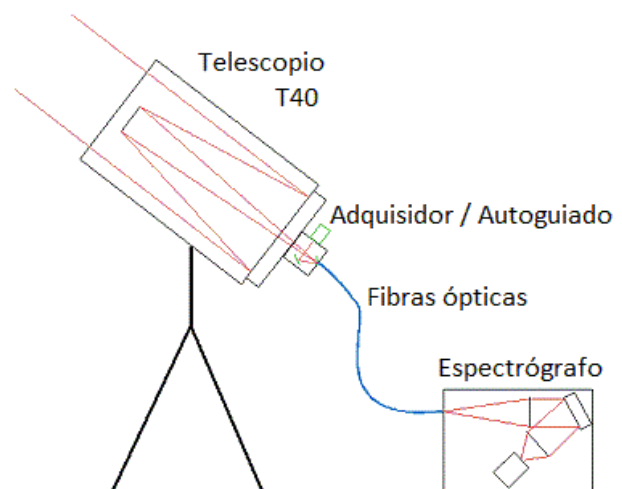


Fig. 4: Esquema de un espectrógrafo alimentado por fibras

- El Adquisidor consistirá en un pentaprisma cuya primera superficie de reflexión tendrá las fibras incrustadas para transmitir al instrumento el objeto centrado en el campo del telescopio. Así, a la salida del pentaprisma, tendremos una imagen del campo visual del telescopio. Este campo visual podrá usarse para el apuntado del telescopio así como para los sistemas de autoguiado del mismo.³

Tras el paso por el adquisidor, la luz de nuestro objeto pasará al haz de fibras ópticas. Así, además de cribar la luz a estudiar en el espectrógrafo, procedemos a ordenar la luz en forma de un *array* vertical haciendo de rendija larga de un espectrógrafo tradicional. El haz se compone de 7 fibras dispuestas de manera circular en el extremo de entrada, permitiendo obtener tanto un objeto puntual y sus alrededores como un objeto extenso con una fibra al centro del mismo. Mientras que a la salida, el grupo de fibras está posicionado de manera lineal, con la primera para el objeto de estudio.

- El Espectrógrafo es el lugar donde llega el array de fibras realineado, desde donde procederemos a colimar el haz de luz de las fibras, para pasar por el elemento dispersor y llevar los 7 espectros hasta nuestro sensor.

³ En este trabajo no se ha profundizado en el diseño del Adquisidor, pues ya tiene un diseño previo para el T40.

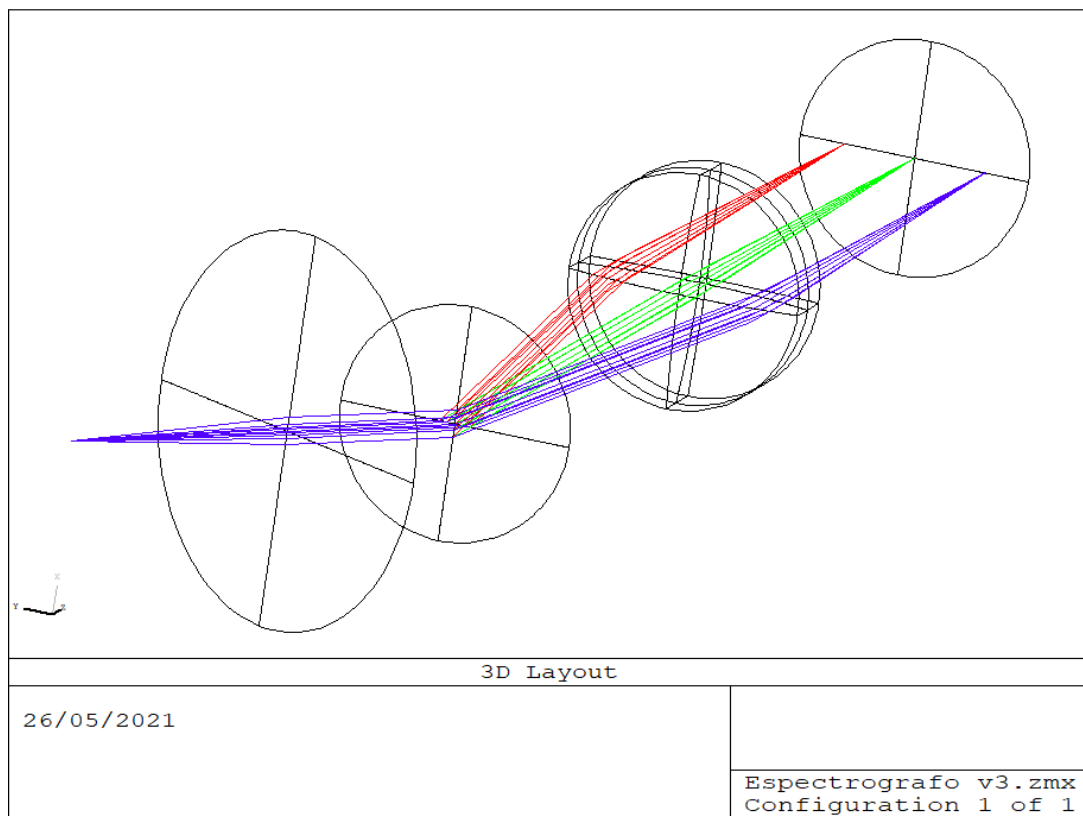


Fig. 5: Trazado de rayos dentro del espectrógrafo, realizado en OpticStudio™ Zemax ® donde se aprecian los cuatro diferentes elementos ópticos: lente simple de colimación, elemento dispersor, lente compuesta de cámara y plano focal.

4.2.1. Partes del espectrógrafo

Un espectroscopio sencillo requiere de pocos elementos: una lente de colimación, un elemento dispersivo, otra lente de cámara y el detector. Para nuestro caso hemos predefinido una serie de requerimientos que nos delimitan el diseño. Vamos a evaluarlo en esta sección.

En esta imagen del banco óptico del Laboratorio del IAC se pueden apreciar los siguiente elementos dispuestos para las pruebas:

1. Extremo final de las fibras
2. Lente comercial de colimación
3. Red de difracción de transmisión
4. Lente simple de cámara
5. Sensor NIKON en el plano focal con tamaño estándar APS-C

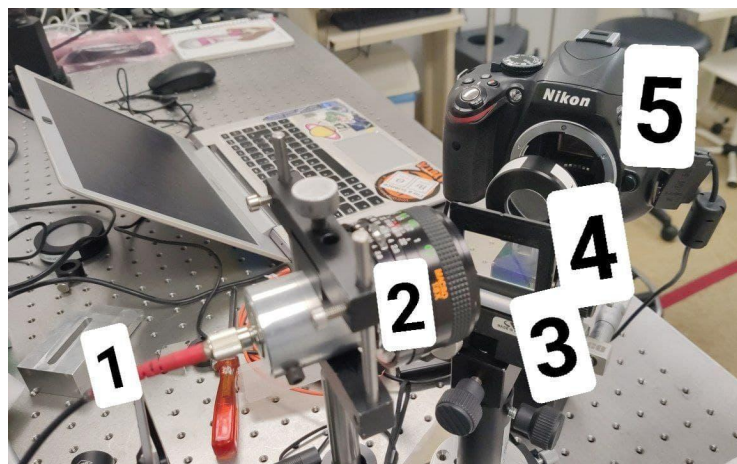


Fig. 6: Disposición de elementos del Espectrógrafo

4.2.1.1. Entrada del array de fibras

Esta pieza requiere sostener de manera firme el extremo de la fibra por el que recibimos el haz de luz y apuntarlo en la dirección de la lente colimadora, lo que definirá el eje óptico de entrada.

A la entrada de la fibra en el Adquisidor tendremos el objeto de estudio y podremos colocar el array en objetos puntuales así como en objetos extensos tal y como se ve en la *Figura 7*.

Como vemos en la *Figura 8*, cada fibra producirá su espectro en un orden vertical.

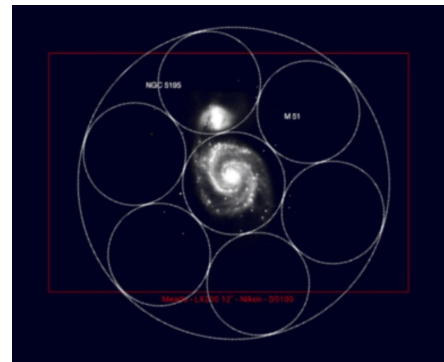


Fig. 7: Array de fibras sobre M51, la Galaxia del remolino y su compañera M51B

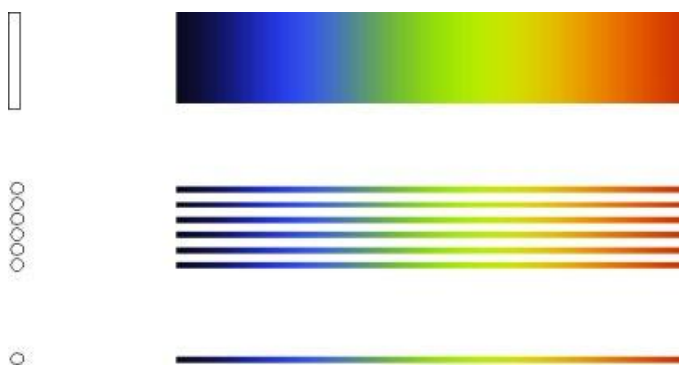


Fig. 8: Espectros de una rendija y *array* de fibras

1. Espectro continuo producido por una rendija larga tradicional.
2. Espectro continuo producido por diferentes fibras dispuestas en línea como en el diseño.
3. Espectro producido por una fibra única.

4.2.1.2. Lente de colimación

Nuestra lente de colimación requiere un tamaño suficiente para contener el haz de luz, cualquiera que sea el haz que entre por el telescopio. Por lo que optamos por una lente amplia, una lente usada y comercial de Nikon modelo NIKKOR 28mm f/2.8, con la que garantizar el paso de luz en una gran variedad de rangos focales, incluyendo el haz habitual del telescopio T40 que tiene una razón focal f/10 y nos ocupará por tanto unos escasos 3 mm en el centro de la lente; lo que además minimiza las posibles aberraciones de la misma⁴.



Fig. 9: Objetivo Nikon® NIKKOR™ con focal f=28mm y apertura f/2.8.

⁴ Los rayos de luz atraviesan los elementos en aproximación paraxial, minimizando aberraciones.

4.2.1.3. Elemento dispersivo

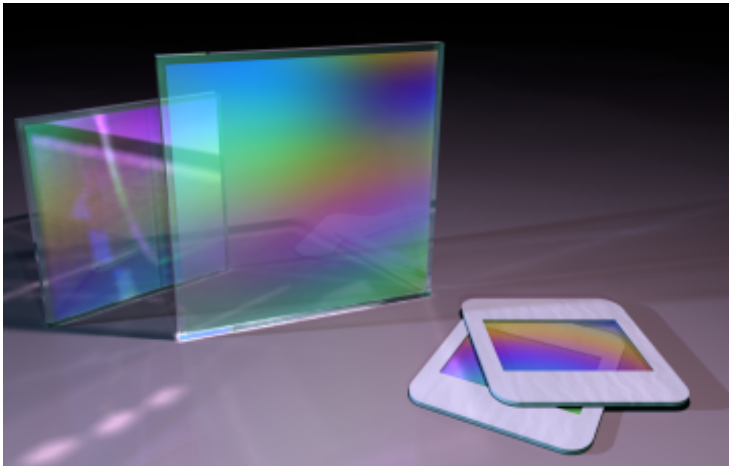


Fig. 10: Redes de difracción de transmisión en diferentes formatos.

La red de difracción utilizada es una habitual del Laboratorio y tiene una densidad de líneas de mil líneas por milímetro. $N = 1000 \text{ l/mm}$.

Aunque intentamos trabajar con una red de difracción holográfica, no correspondía con nuestras características por estar optimizada para otro rango del espectro.

4.2.1.4. Lente de cámara

La lente de cámara es una lente compuesta del fabricante Edmund Optics, de las que se utilizan habitualmente en el Laboratorio de Óptica del IAC. En este caso es doblete de 25mm de diámetro y 75mm de longitud focal⁵, con los que garantizar la distancia necesaria para la versatilidad de sensores a los que queremos poder llegar.

Estas lentes nos ofrecen una gran relación calidad-precio minimizando posibles problemas como desalineamientos o reflexiones internas.



Fig. 11: Lentes Edmund Optics®

4.2.1.5. Detectores



Fig. 12: Cámara Nikon D5100 utilizada

Durante el trabajo he utilizado como sensor principal el de una cámara Nikon D5100 del Laboratorio con un sensor CMOS de 23.6 x 15.6 mm de tamaño y 16 megapíxeles de resolución (4928 x 3264 píxeles efectivos).⁶ Esta ha servido tanto para la toma de las imágenes de prueba así como de ejemplo de cámara comercial con la que efectuar las imágenes finales tras la finalización del instrumento.

Como uno de nuestros objetivos es poder acoplar casi cualquier cámara comercial, la carcasa del instrumento⁷ incorporará una rosca macho tipo T2 (M42*0.75) con la que acoplar la mayoría de cámaras del mercado. Tanto cámaras comerciales como especializadas para astronomía son compatibles o con esta rosca T2 o con los acopladores desde 1.25", 2" ó 3", que son las salidas habituales en la mayoría de telescopios.



Fig. 13: Acopladores de rosca T2 (M42*0.75)

⁵ [\[PDF\] Especificaciones del doblete Edmund Optics con número de serie: 47639](#)

⁶ [Especificaciones oficiales de la cámara Nikon D5100](#)

⁷ Previsto en la siguiente etapa de desarrollo: la construcción del prototipo del instrumento en metal o impresora 3D.

4.2.1.6. Lámparas de calibración

Como no tenemos la garantía de que las irregularidades de la posición de la red de difracción así como la propia red nos den el mismo resultado siempre en todos los tramos del espectro; necesitaremos que exista un método de calibración. Éste suele consistir en una lámpara cuya emisión es la propia del gas interno, de espectro bien conocido.

Por su bajo precio y fácil uso, habíamos previsto utilizar una pequeña lámpara de Helio (He), que tiene multitud de líneas desde el extremo rojo del espectro hasta tonos verdes. Sin embargo Carlos nos ha recomendado utilizar una lámpara que al menos cubra los extremos del espectro visible, para poder extrapolar la dispersión espectral con cada cambio que pueda sufrir el sistema.

La lámpara candidata de *He* tiene grandes ventajas como su reducido tamaño y que sólo requiere una toma de 12V y poca potencia (usual también en sistemas de telescopios portátiles). Sin embargo el instrumento está carente de una lámpara de calibración definitiva. Aunque por las características de las probadas en la siguiente sección; no tengo claro si será fácil encontrar una que cumpla el requisito espectral y además sea tan fácil de implementar. Aunque sería posible implementar 2 lámparas con diferentes emisiones que sean complementarias para cumplir todos los requisitos.

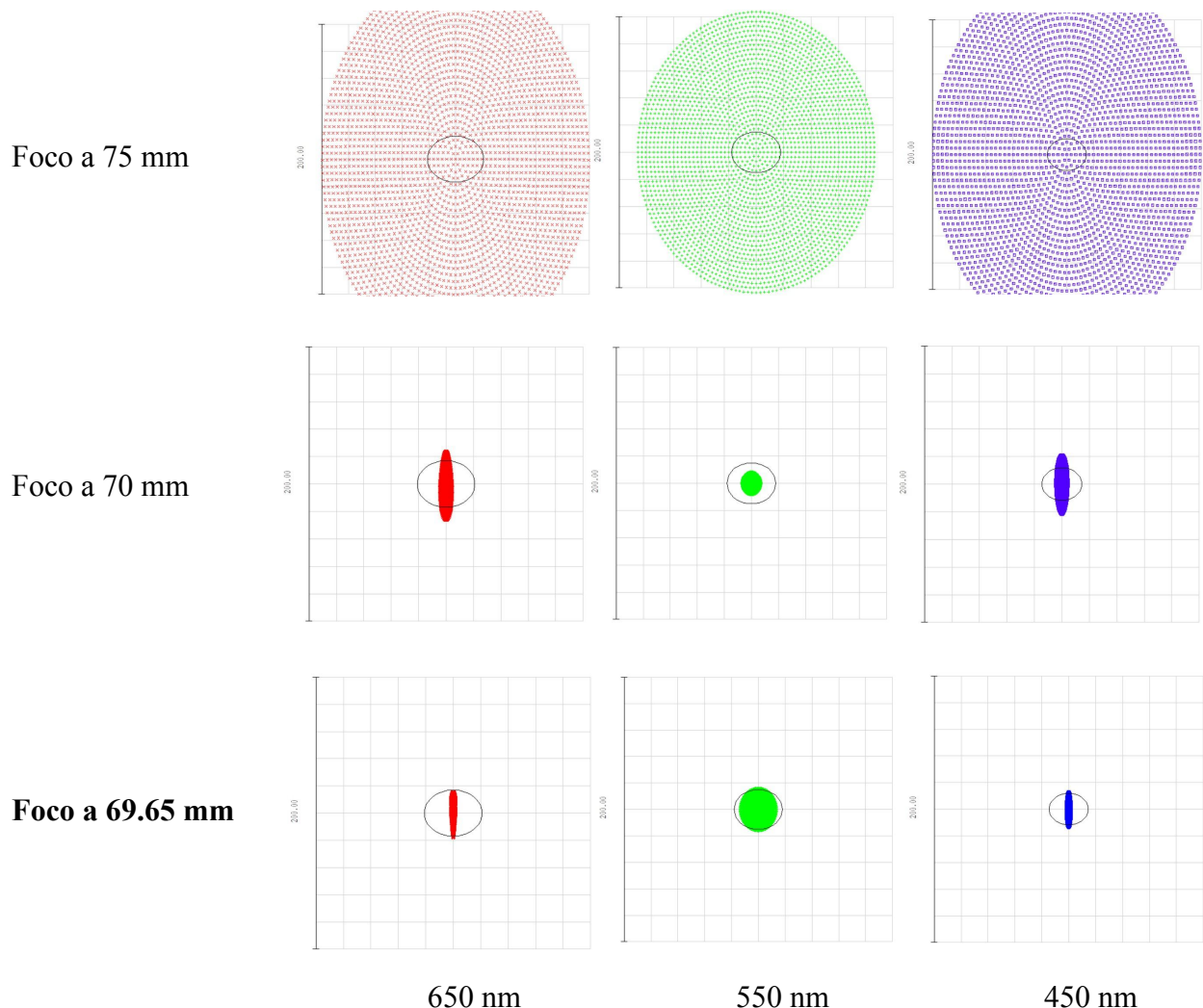
5. Resultados técnicos

A la hora de trabajar en el laboratorio fueron surgiendo diversos resultados parciales de diferente relevancia para el diseño final. Entre los resultados más destacados tenemos:

5.1. Foco final del sistema

Uno de los datos más importantes descubiertos durante el trabajo es la manera en que los rayos se terminan de concentrar en el sensor. Esto en teoría debe suceder a la distancia focal de la lente de cámara, que es de 75 mm. Sin embargo, en los diagramas de manchas pudimos observar que lográbamos mejoría bajando hasta los ~ 70 mm, aunque finalmente logramos un valor de foco a 69.65 mm donde conseguimos un buen compromiso entre los diagramas de manchas de las 3 longitudes de onda estudiadas: rojo a 650 nm, verde a 550 nm y azul a 450 nm.

Tabla 2: Resultados del cambio en el foco de la lente de cámara



La tabla anterior muestra los diagramas de manchas a la misma escala de $200 \mu\text{m}$ y con una superposición del disco de Airy del sistema. Vemos que aunque con un foco a 70 mm el color verde dispersa menos la luz que con nuestro resultado final de 69.65 mm, los rojos y azules están más optimizados en el último valor.

5.2. Compatibilidad del diseño óptico

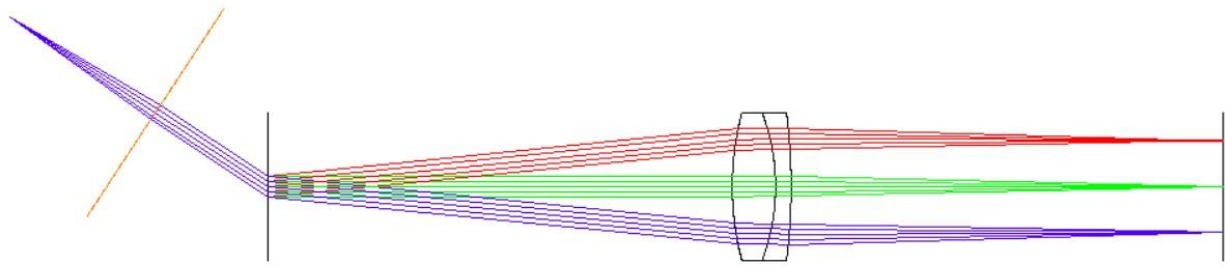


Fig. 14: Vista cenital del diseño óptico del espectrógrafo, con un haz de luz de entrada con razón focal $f/10$ como el T40

El diseño del espectroscopio está optimizado para el *T40*, que tiene razón focal $f/10$. Independientemente del telescopio utilizado, se comportará de igual manera mientras el telescopio tenga la misma razón focal; aunque tendrá diferente aumento final según las proporciones focales del telescopio e instrumentos utilizados.

Sin embargo dado que pretendemos que sea ampliamente utilizado entre los diferentes telescopios de los Observatorios de Canarias, veremos que gracias a la amplitud de las lentes utilizadas se podrá utilizar el mismo instrumento en un gran rango de razones focales, y por ende, de telescopios diferentes. Lo vemos a continuación:

Tabla 3: Propiedades del sistema con diferentes razones focales de entrada

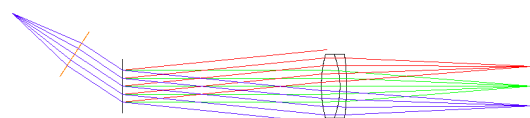
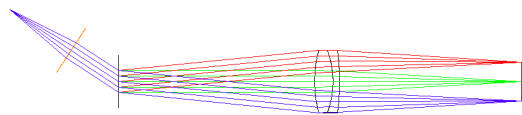
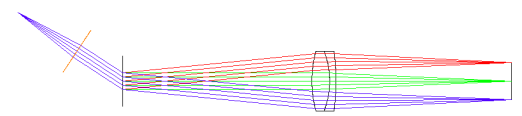
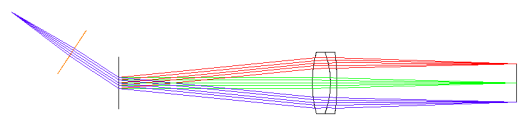
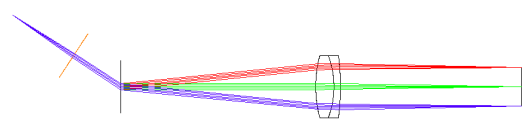
Con razón focal $f/15$, como la de los telescopios portátiles más típicos, así como cualesquiera razones mayores que $f/10$, el haz de luz utiliza aún menos las ópticas y por ello además tendrá menores aberraciones.

Con razón focal $f/8$, “más rápida/luminosa” que $f/10$ empezamos a utilizar más diámetro en la lente colimadora, más red y más lente de cámara; sin llegar al límite.

Con razón focal $f/5$, estamos al límite del diámetro de la lente de cámara, notando los defectos y aberraciones propios de trabajar al borde de las lente.

Con razón focal $f/4$, el diámetro aparente en la lente de cámara coincide con el diámetro de la lente de cámara. Tendremos aberraciones y comienza el viñeteo.

Con razón focal $f/2.8$ además de tener efectos claros de viñeteo, estaremos abusando del diámetro de las lentes de colimación y cámara; maximizando los defectos del diseño y perdiendo luz del telescopio.



Con estos datos comprobamos que el diseño es ampliamente compatible con multitud de telescopios, con un límite útil en razones focales rápidas de hasta $f/4$, notando posibles aberraciones con $f/5$ e inferiores.

5.3. Sensibilidad

Dado que contamos con tamaños de telescopio rondando los 40 cm, como el propio T40, podemos aproximar la magnitud límite en ~ 20.5 mag. Como también usamos fibras ópticas, estamos quedándonos con una pequeña parte del campo visual y por tanto poca luz del telescopio. Además de la posible degradación que producen las fibras, con lo que entiendo que ésta será la magnitud límite de nuestros objetivos, antes de producir sus espectros.

5.4. Escala del telescopio (resolución espacial)

Para el caso del telescopio del proyecto T40, con $D=400$ mm, longitud focal efectiva en $F=4000$ mm, trabajaremos con una escala de placa tal que:

$$\text{Escala} = 206265 [\text{arcsec} / \text{rad}] / F [\text{mm}] \quad (\text{EQ. 1})$$

$$\text{Escala} = 206265 [\text{arcsec} / \text{rad}] / D[\text{mm}] * (F/\#) \quad (\text{EQ. 2})$$

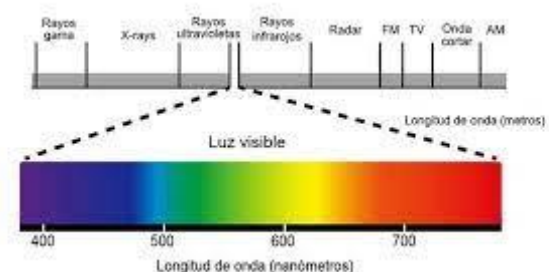
$$\text{Escala} = 51.56625 [\text{arcsec} / \text{mm}] = 0.05156625 [\text{arcsec} / \mu\text{m}] \quad (\text{EQ. 3})$$

Con lo que obtenemos en nuestras fibras de $80 \mu\text{m}$ de diámetro interior y $120 \mu\text{m}$ de diámetro exterior, obtendremos una resolución espacial efectiva según:

- **Diámetro angular de unos 4" en cada fibra de nuestro array ($\theta \sim 4.1253$ arcsecs).**
- **Unos 20" en el conjunto de nuestras 7 fibras dispuestas en círculo ($\theta \geq 18.56385$ arcsecs).**

5.5. Rango espectral

Como nos vamos a restringir al espectro visible, podemos usar la mayoría de lentes usuales en la industria con aplicaciones comerciales como la fotografía. En la mayoría de cámaras comerciales el espectro visible está limitado desde los $\sim 420\text{nm}$ hasta los $\sim 720\text{nm}$.



5.6. Resolución espectral total limitada por difracción

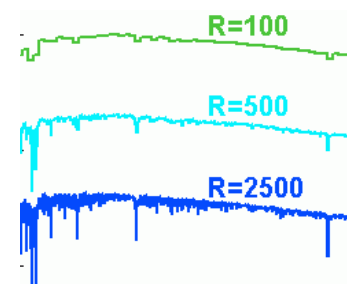
La resolución espectral total (R), o poder resolutivo, es la capacidad de resolver una cierta longitud de onda (λ_0) respecto a otra (λ) desplazada una pequeña distancia ($\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$).

Su definición es la siguiente:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (\text{EQ. 4})$$

Dado que tenemos una red de difracción con un número de líneas (N):

$$N = 1000 \text{ líneas} / \text{mm} \quad (\text{EQ. 5})$$



y nuestro haz de salida en la fibra es de ratio $f/10$, tras pasar la lente colimadora de 28mm $f/2.8$ nos resultará en un diámetro de haz de ~ 3 mm (2.8 mm con degradado). Por lo que atravesará un número total de líneas (N_t) de:

$$N_t = 1000 \text{ líneas/mm} * 3 \text{ mm} = 3000 \text{ líneas} \quad (\text{EQ. 6})$$

Resultando en una **resolución espectral limitada por difracción**, para el primer orden, según:

$$R_d = N_t * \text{orden} = 3000 * (1) = 3000 \quad (\text{EQ. 7})$$

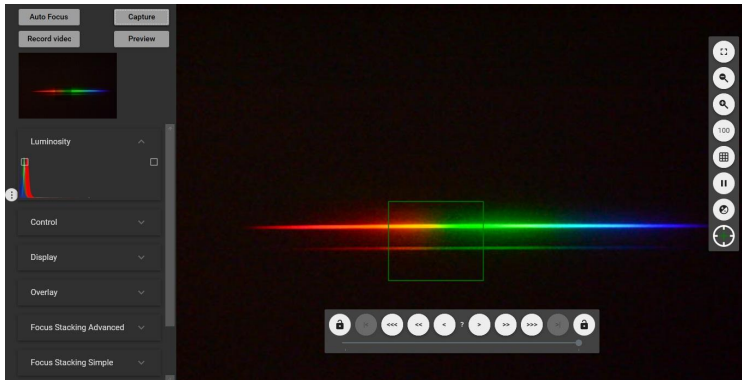


Fig. 15: Software *digiCamControl* para análisis de imágenes en Windows

5.7. Resolución espectral ($\Delta\lambda$)

El resultado anterior nos permite hallar la resolución espectral para el rango óptico antes de llegar al sensor de nuestra cámara. Con la longitud de onda central ($\lambda_c \sim 570$ nm), aquella será aproximadamente:

$$R_d = \frac{\lambda_c}{\delta\lambda} \Rightarrow \delta\lambda = \frac{\lambda_c}{R_d} = \frac{570 \text{ [nm]}}{3000} = 0.19 \text{ nm} \quad (\text{EQ. 8})$$

$$\delta\lambda \in (0.12 - 0.24) \text{ nm} \quad \text{en nuestro rango espectral} \quad (\text{EQ. 9})$$

5.8. Resolución espectral en el sensor

Como tenemos la dispersión de todo el espectro visible dentro de nuestro sensor, podemos conocer cómo se reparte el espectro entre los píxeles de la cámara conocido su tamaño físico.

Nuestro sensor de trabajo es el de la Cámara Nikon D5100 de 2015, un sensor de formato APS-C de tipo CMOS con gran número de ventas y similar al tipo de sensor más habitual en el mercado.

El tamaño y resolución nativos del sensor APS-C de nuestra Nikon es:

$$H_x = 23.6 \text{ mm} \simeq 23000 \text{ } \mu\text{m} \quad \text{Anchura del sensor} \quad (\text{EQ. 10})$$

$$P_x = 4928 \text{ px} \quad \text{Resolución a lo ancho del sensor} \quad (\text{EQ. 11})$$

Por lo que su tamaño de píxel resulta en:

$$23.6 \text{ mm} / 4928 \simeq 4.78 \text{ } \mu\text{m/px} \quad \text{Tamaño de píxel} \quad (\text{EQ. 12})$$

Aunque hemos colocado la longitud de onda central del rango óptico ~520 nm en el centro del sensor, necesitamos hallar los extremos del espectro que seremos capaces de registrar dado el tamaño de nuestro sensor.

Para ello vamos a utilizar la ecuación de la **dispersión lineal de la red (D)**, que va en función del tamaño de píxel, el orden utilizado ($k=1$) y número de líneas de la red ($N=1000$), la focal de la lente de cámara ($f_2=75\text{mm}$) y el ángulo de salida respecto a la normal de la red (0° , porque trabajamos en el ángulo de Blaze de la red para el 1^{er} orden):

$$D = \frac{10^7 [\text{Å/mm}] \cdot px[\text{mm}] \cdot \cos(\theta_{out})}{k \cdot N[l/\text{mm}] \cdot f_2[\text{mm}]} \Rightarrow \quad (EQ. 13)$$

$$\Rightarrow D = \frac{10^7 \cdot 4.78 \cdot 10^{-3} \cdot 1}{1 \cdot 1000 \cdot 75} = 0.6373 \text{ Å/px} \quad (EQ. 14)$$

Lo que a lo ancho de los píxeles (P_x) resulta en una extensión espectral ($\Delta\lambda$):

$$\Delta\lambda = 4928 px * 0.6373 \text{ Å/px} \simeq 3140.779 \text{ Å} \quad (EQ. 15)$$

Que a su vez nos da unos extremos espectrales tales que:

$$\lambda_{mín} = \lambda_c - \frac{\Delta\lambda}{2} = 5200 - 1570.39 \text{ Å} = 3629.6 \text{ Å} \quad (EQ. 16)$$

$$\lambda_{máx} = \lambda_c + \frac{\Delta\lambda}{2} = 5200 + 1570.39 \text{ Å} = 6770.4 \text{ Å} \quad (EQ. 17)$$

Lo que permite garantizar que el extremo violeta del visible está disponible (~3800Å) así como también la línea espectral H α (6563Å) en el extremo rojo.

5.9. Calibración de los primeros espectros de laboratorio

Un paso importante es poder expresar nuestros espectros en términos de longitud de onda en lugar de píxeles a lo largo del eje horizontal. Para ello debemos tomar una serie de imágenes de referencia de diferentes líneas espectrales conocidas, con las lámparas de calibración; así como algunas tomas con las que comprobar los datos hallados.

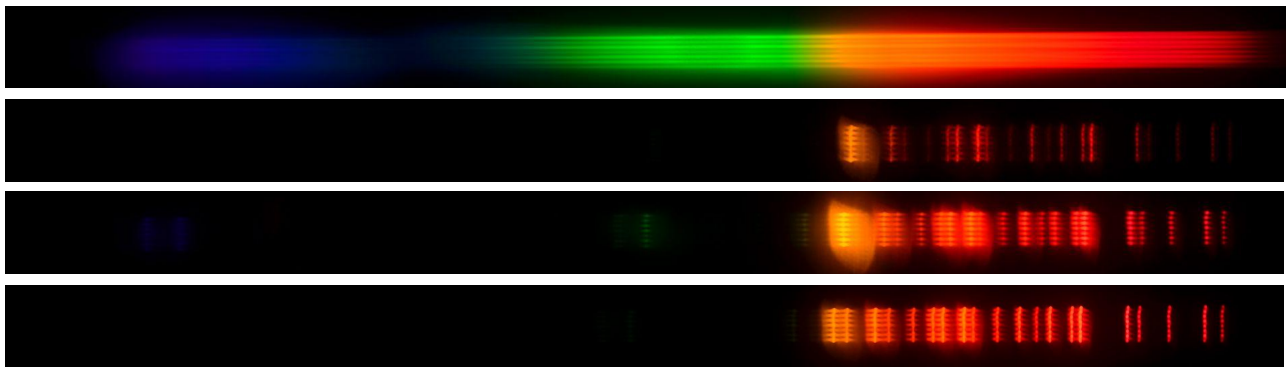
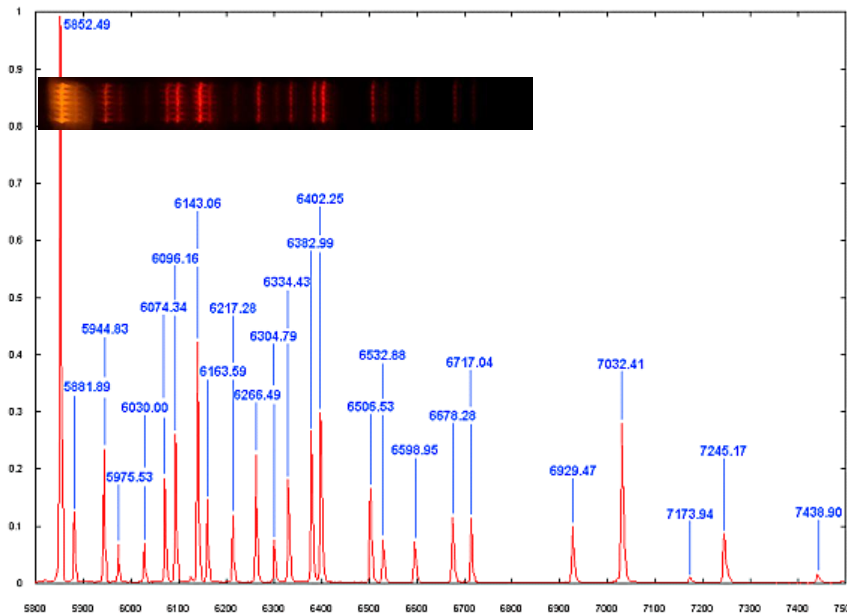


Fig. 16: Espectro continuo y espectros de lámparas de calibración de helio (He), de arriba a abajo: Espectro continuo, *Lamparita de He sin saturar*, *Lamparita saturada* y *lámpara profesional de He*

Las imágenes para la calibración espectral están realizadas con lámparas de helio (He) donde una de ellas, la llamada “*lamparita*” a priori aún por reemplazar; fue la más utilizada por su simplicidad.

Fig. 17: Flujo normalizado de las principales líneas del helio (He)



Principales líneas de (He) [Å]

5820.1558	6266.495
<u>5852.4878</u>	6304.789
5881.895	6334.4278
5944.8342	6382.9917
5975.534	6402.246
6029.9971	6506.5281
6074.3377	6532.8822
6096.1631	6598.9529
6128.4499	6678.2764
6143.0626	6717.043
6163.5939	6929.4673
6217.2812	7024.0504

(nótese la correlación entre las líneas esperadas y las líneas observadas)

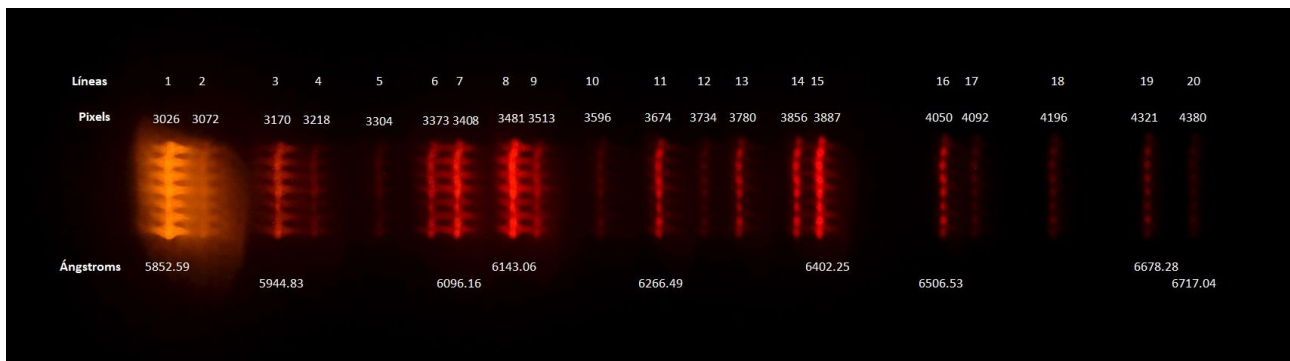


Fig. 18: Detalle de las posiciones en Píxeles de 20 líneas del helio (He) de nuestra lámpara de calibración y su correlación

Ahora que ya tenemos datos del espaciado de líneas espectrales podemos realizar un ajuste lineal, de cara a realizar la calibración espectral necesaria para los espectros tomados con este instrumento.

Tomando **intervalos espectrales** hasta la primera y más brillante línea ($\lambda_1 \sim 5852\text{Å}$):

$$\Delta\lambda_i = \lambda_i - \lambda_1 = \lambda_i - 5852,49 \text{ Å} \tag{EQ. 18}$$

tendremos que la relación entre la longitud de onda (λ) y la posición de nuestro espectro en píxeles (px) estará en función de los parámetros A y B de la relación lineal, tal que:

$$\lambda [\text{Å}] = A + B \cdot x[\text{px}] \tag{EQ. 19}$$

Donde ya vemos que nuestro parámetro A será la longitud de onda de referencia:

$$A = \lambda_1 = 5852,49 \text{ Å} \tag{EQ. 20}$$

Tabla 4: Líneas de Helio en nuestra calibración

Línea espectral	1	8	15	19	3	7	11	16	20
Posición (px)	3026	3481	3887	4321	3170	3408	3674	4050	4380
Longitud de onda (Å)	5852.59	6143.06	6402.25	6678.28	5944.83	6096.16	6266.49	6506.53	6717.04

Con las relativas posiciones y valores de estas líneas espectrales podremos hallar los espaciados en el sensor correspondientes a los diferentes intervalos espectrales, permitiendo hallar de mejor manera la dispersión en el sensor, como lo visto en la *sección 5.7*.

Tabla 5: Datos de la relación lineal en la calibración espectral

	$\Delta\lambda_8$	$\Delta\lambda_{15}$	$\Delta\lambda_{19}$	$\Delta\lambda_3$	$\Delta\lambda_7$	$\Delta\lambda_{11}$	$\Delta\lambda_{16}$	$\Delta\lambda_{20}$
Intervalo (Å)	290,47	549,66	825,69	92,24	243,57	413,9	653,94	864,45
Δx (px)	455	861	1295	144	382	648	1024	1354
B (Å/ Δx)	0,63840	0,63840	0,63760	0,64056	0,63762	0,63873	0,63861	0,63844

Y de aquí obtenemos otro parámetro (B) como el promedio de la dispersión lineal en el sensor ($|B|$), que además es acorde al resultado de la ecuación 14 anterior (EQ.14) donde lo hallábamos mediante el tamaño completo del sensor y todo el rango espectral. Además de confirmar que la aproximación lineal es suficiente para nuestro caso. Resultando en:

$$D \simeq |B| = 0,6385 \text{ \AA}/px \quad (\text{EQ. 21})$$

Resultando la ecuación 19 (EQ.19) de la calibración espectral tal que:

$$\lambda(X) [\text{\AA}] = 5852,49 [\text{\AA}] + 0,6385 [\text{\AA}/px] \times X \quad (\text{EQ. 22})$$

Tabla 6: Datos de la relación lineal en la calibración espectral

	$\Delta\lambda_8$	$\Delta\lambda_{15}$	$\Delta\lambda_{19}$	$\Delta\lambda_3$	$\Delta\lambda_7$	$\Delta\lambda_{11}$	$\Delta\lambda_{16}$	$\Delta\lambda_{20}$
Intervalo (Å)	290,47	549,66	825,69	92,24	243,57	413,9	653,94	864,45
Δx (px)	455	861	1295	144	382	648	1024	1354
B (Å/ Δx)	0,63840	0,63840	0,63760	0,64056	0,63762	0,63873	0,63861	0,63844

6. Conclusiones

Tras múltiples sesiones de trabajo, tanto fuera como dentro del Laboratorio de Óptica del IAC; con este trabajo he llegado a una serie de conclusiones de relevancia. Algunas más generales de este tipo de trabajos universitarios y otras muy particulares acerca del diseño de este tipo de espectrógrafos ópticos de baja resolución.

- ★ Trabajamos restringidos al espectro visible, habiendo probado 3 longitudes de onda: rojo en 650 nm, verde en 550 nm y azul en 450 nm.
- ★ A la hora de realizar diferentes proyectos astronómicos, la elección del telescopio, y su tamaño; determinará la escala de placa y así qué objetos entrarán en el campo de nuestras fibras.
- ★ La resolución del sensor será la que nos permitirá mayor o menor resolución espectral final, pues estaremos limitados por el tamaño del sensor.
- ★ La resolución del sistema es de $R \sim 3000$
- ★ Hemos optimizado el foco en 69.65 mm con buen balance de los diagramas de manchas.
- ★ Aunque la entrada del instrumento está optimizada para razón focal $f/10$, es ampliamente compatible con telescopios con razones focales de hasta $f/4$.
- ★ El campo visual total es de unos $20''$ en el array pero de unos $\theta \sim 4.12''$ en cada fibra.
- ★ La lámpara actual de *He* tiene grandes ventajas aunque no cubre todo el espectro.
- ★ La resolución espectral en el sensor es de alrededor de $|B| = 0,6385 \text{ \AA}/\text{px} \sim D$

7. Lista de Figuras

- ★ Ilustración acerca de Joseph von Fraunhofer en la reedición de la serie COSMOS: A Spacetime Odyssey, de 2014.
- ★ Edificio de Física y Matemáticas de la ULL.
- ★ Observatorio del Teide, con un instrumento del alumno para pruebas de observación en microondas en otro trabajo.
- ★ Esquema de un espectrógrafo alimentado por fibras.
- ★ Trazado de rayos dentro del espectrógrafo, realizado en OpticStudio™ Zemax ® donde se aprecian los cuatro diferentes elementos ópticos: lente simple de colimación, elemento dispersor, lente compuesta de cámara y plano focal.
- ★ Disposición de elementos del Espectrógrafo.
- ★ Array de fibras sobre M51, la Galaxia del remolino y su compañera M51B.
- ★ Espectros de una rendija y array de fibras.
- ★ Objetivo Nikon® NIKKOR™ con focal $f=28\text{mm}$ y apertura $f/2.8$.
- ★ Redes de difracción de transmisión en diferentes formatos.
- ★ Lentes Edmund Optics®.
- ★ Cámara Nikon D5100 utilizada.
- ★ Acopladores de rosca T2 (M42*0.75).
- ★ Vista cenital del diseño óptico del espectrógrafo, con un haz de luz de entrada con razón focal $f/10$ como el T40.
- ★ Software digiCamControl para análisis de imágenes en Windows.
- ★ Espectro continuo y espectros de lámparas de calibración de helio (*He*), de arriba a abajo: Espectro continuo, Lámpara de *He* sin saturar, Lámpara saturada y lámpara profesional de *He*.
- ★ Flujo normalizado de las principales líneas del helio (*He*).
- ★ Detalle de las posiciones en Pixels de 20 líneas del helio (*He*) de nuestra lámpara de calibración y su correlación.

8. Lista de Tablas

- ★ *Tabla 1: Materiales iniciales del proyecto*
- ★ *Tabla 2: Resultados del cambio en el foco de la lente de cámara*
- ★ *Tabla 3: Propiedades del sistema con diferentes razones focales de entrada*
- ★ *Tabla 4: Líneas de Helio en nuestra calibración*
- ★ *Tabla 5: Datos de la relación lineal en la calibración espectral*
- ★ *Tabla 6: Datos de la relación lineal en la calibración espectral*

9. Bibliografía

[1] Vik Dhillon *Astronomical Techniques: the course* (University of Sheffield)

[2] Christian Buil *STAGE DE SPECTROGRAPHIE ASTRONOMIQUE* (Autor del libro “CCD Astronomy : Construction and Use of an Astronomical CCD Camera”)

[3] Christian Buil *Design a classical spectrograph*

Agradecimientos

- Al equipo de Instrumentación del IAC, por tanto apoyo altruista con los años.
- A los estudiantes usuarios del Laboratorio de Óptica: Aitor, Noelia, Ana, Esther y Mireia.
- A mi familia y amigos que tanto apoyo me han mostrado: Ali, Leyla, Rodri, Natascia, Montse, Orisbel, Josep y Lucas.