

ESPECTROS LUMINOSOS: DOS ÁTOMOS ÁS ESTRELAS*

CARMEN CARRERAS BÉJAR,

JUAN PEDRO SÁNCHEZ-FERNÁNDEZ,

MANUEL YUSTE LLANDRES

Abstract

As a contribution to the burst of science outreach during the International Year of Astronomy, we have designed a simple spectroscope with a narrow slit, a converging lens and a diffraction grating. With it, we have been able to observe the emission spectra from different lamps (H, He, Na,...) in the laboratory and black absorption lines from the Sun, known as Fraunhofer lines. The assembly of this spectroscope is very easy and can be used in Secondary School classrooms for subjects such as: "Physics and Chemistry", "Science for the modern world", "Introduction to Astronomy" and "Technology".

Adicado á Dra. Antonia Ferrín (Ourense, 1914-Santiago de Compostela, 2005), autora da primeira Tese de Doutoramento -dirixida por D. Ramón María Aller Ulloa- sobre Astronomía realizada por una muller en España, e a primeira Tese que foi defendida na Sección de Matemáticas da Universidade de Santiago de Compostela.

RESUMO

A espectroscopía é unha técnica fisicoquímica que permite coñecer a estrutura dos átomos e as moléculas a partir das imaxes que se obteñen a través de dous fenómenos ópticos: a refracción da luz por un prisma e a difracción a través dunha rede. Estas imaxes coñécense desde a época de Newton co nome de espectro ("alma") da luz.

A partir dos espectros de fontes luminosas (por exemplo, o Sol, unha vela, unha lámpada incandescente, un tubo fluorescente,) pódese determinar a estrutura dos átomos de que están compostas, é dicir, podemos coñecer

* Traducido do castelán por Ramón Cid.

os seus niveis atómicos, as enerxías dos devanditos niveis, as posibles transicións. Cada átomo ten un espectro típico que o identifica coma se fose o seu código de barras.

Como contribución á divulgación da Ciencia no Ano Internacional da Astronomía, deseñamos un sinxelo espectroscopio cunha fenda estreita, unha lente converxente e unha rede de difracción, co que podemos observar os espectros de emisión de diversas lámpadas (H, He, Na,) no laboratorio, e as liñas negras de absorción do espectro do Sol, coñecidas como liñas de Fraunhofer.

A comparación das liñas dos espectros de emisión (de cores brillantes) coas liñas negras dos espectros do Sol e doutras estrelas, permite detectar a existencia dos elementos químicos presentes nas atmosferas estelares.

A construción deste espectroscopio é moi sinxela e pode ser utilizado nas aulas de Educación Secundaria para as clases de “Física e Química”, “Ciencias para o mundo contemporáneo”, “Introdución á Astronomía” e “Tecnoloxía”.

INTRODUCCIÓN

Newton, en 1666, utilizando o fenómeno da refracción nun prisma de vidro realizou o seu famoso experimento de descomposición da luz branca procedente do Sol en cores, ao que denominou o seu espectro [1]. Na Figura 1 pode verse un exemplo: a luz entra no prisma pola dereita, refráctase e reflíctese nas súas caras, e transmítese ao exterior, recolléndose o espectro sobre unha folla de papel branco.

En 1814, o físico alemán Fraunhofer observou unhas liñas escuras sobre o espectro do Sol. Estas liñas foron interpretadas posteriormente, en 1859, polos físicos alemáns Bunsen e Kirchhoff, dando nacemento a unha técnica de análise da composición da materia que ten revolucionado a Ciencia do século XX: a Espectroscopía. Na Figura 2 pódese ver o debuxo orixinal de Fraunhofer no que sinala as liñas negras máis importantes.

Bunsen e Kirchhoff atribuíron estas liñas á absorción da luz solar polos átomos da súa atmosfera. A identificación realizárona asumindo que cando os átomos se encontran en forma de vapor (átomos libres) absorben e emiten luz nas mesmas frecuencias. É dicir, cando no laboratorio queimamos sodio co chisqueiro de Bunsen aparece unha luz amarela: emisión do seu famoso par dobrete amarelo. Inversamente, se enviamos luz branca sobre vapor de sodio, este absorbe a radiación amarela do espectro. Isto é o que pasa na atmosfera solar. Existen átomos de sodio que absorben a devandita radiación e por iso observamos unha liña negra dobre no canto do espectro solar correspondente ao dobrete amarelo. A presenza desta liña negra indícanos que existe sodio na atmosfera solar. O mesmo acontece con moitos outros elementos (ferro, hidróxeno, manganeso...).

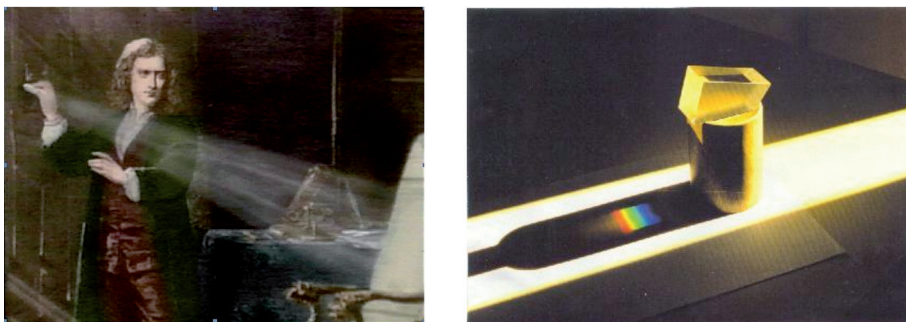


Figura 1: Sir Isaac Newton (1642-1727) e a descomposición da luz do Sol ao atravesar un prisma de vidro.

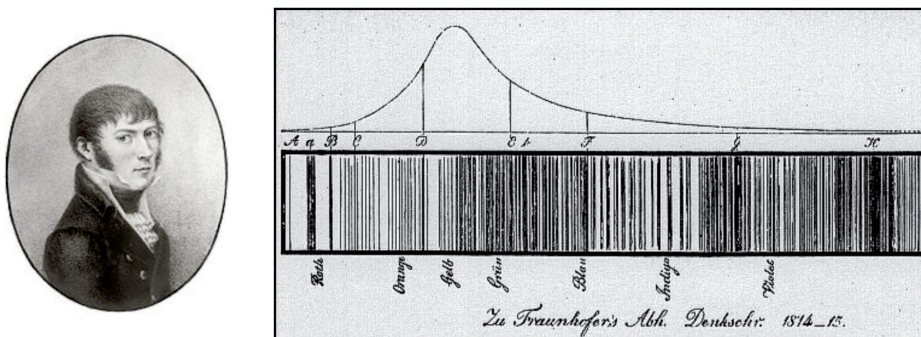


Figura 2: Líñas negras de Fraunhofer (1787-1826).

O químico galego Antonio Casares Rodríguez (Monforte de Lemos, 1812-Santiago de Compostela, 1888), primeiro catedrático de Química da Universidade de Santiago de Compostela, foi un dos iniciadores en España dos métodos espectroscópicos, técnica que estudou e utilizou na análise química de augas minerais e potables, como quedou recollido no seu libro de 1866 indicado na Bibliografía [2].

Na Figura 3 móstranse as liñas negras do espectro visible do Sol (parte superior) e as liñas de emisión obtidas no laboratorio de diferentes elementos químicos (parte inferior). Como pode verse, pódense identificar as liñas de emisión coas de absorción. Este é o principio no que se basea a análise espectroscópica.

A Espectroscopía seguiu a se desenvolver espectacularmente ao longo de todo o século XX, e as novas técnicas de detección permítenos dispor de espectros moi precisos tanto do Sol, de estrelas moi afastadas..., como de substancias no laboratorio. Un exemplo é o magnífico espectro visible do Sol proporcionado pola NASA (ver Figura 4). O final de cada fila horizontal empalma co principio da fila seguinte e proporciónanos unha visión moi ampla do espectro solar cunha gran cantidade de liñas negras, liñas que nos permiten identificar os elementos químicos que se encontran na atmosfera solar.

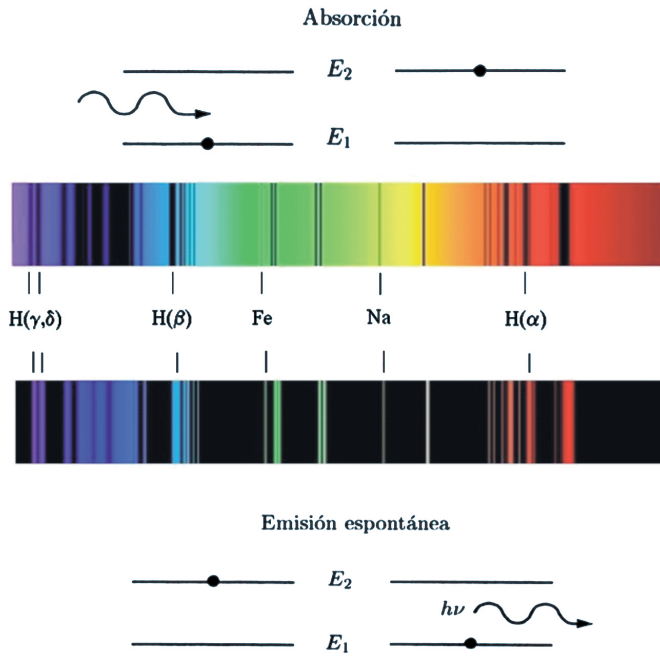


Figura 3: Esquema das liñas negras de absorción de Fraunhofer e das liñas de emisión de diferentes átomos obtidas no laboratorio.

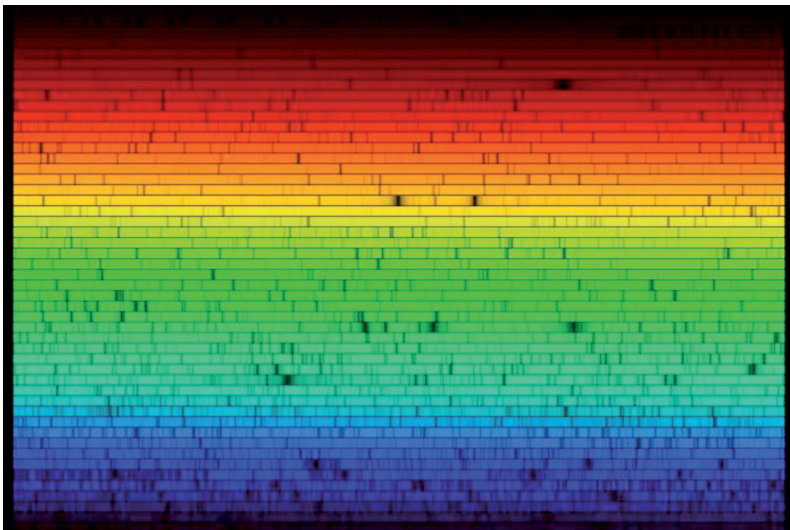


Figura 4: Espectro solar proporcionado pola NASA.
 Imaxe astronómica do 23 de abril de 2006 do Observatorio Solar McMath-Pierce
 (<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap060423.html>).

OBTENCIÓN DE ESPECTROS MEDIANTE UN PRISMA: REFRACCIÓN DA LUZ

Na fotografía da Figura 1 (experimento real) pode verse que cando a luz branca se refracta no prisma as cores do seu espectro saen en direccións diferentes. A lei que establece as traxectorias dos raios é coñecida lei da refracción ou lei de Snell:

$$\text{sen } i = n \text{ sen } r \quad (1)$$

onde i é o ángulo de incidencia, r o de refracción e n o índice de refracción do vidro que depende da lonxitude de onda [3], [4].

Á entrada do prisma, todo os raios constituíntes da luz branca inciden co mesmo ángulo i ; na refracción, as diferentes cores dispérsanse baixo ángulos distintos, debido a que o índice de refracción n varía coa lonxitude de onda λ . Na cara de saída do prisma prodúcese novas refraccións que fan aumentar a separación angular entre as diferentes cores. Este feito é o que se utiliza en Espectroscopía para analizar illadamente as cores das lámpadas.

No esquema da Figura 5 indícase o que acontece na superficie de separación aire-vidro (superficie de entrada no prisma).

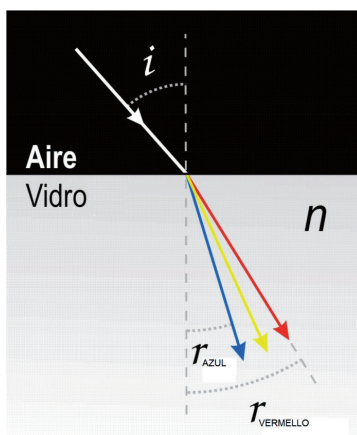


Figura 5: Esquema da descomposición da luz branca en cores na superficie de separación aire-vidro.

Na Figura 6 pode verse a variación de n con λ para un vidro crown típico e na Táboa 1 faise un exercizo de aplicación da lei de Snell para unha superficie de separación aire-vidro crown para catro lonxitudes de onda do espectro visible: 430 nm (azul), 500 nm (verde), 590 nm (amarelo) e 650 nm (vermello). Utilizouse como ángulo de incidencia $i = 45^\circ$ nos catro casos.

Táboa 1: Variación do ángulo de refracción coa lonxitude de onda

Cor	λ (nm)	N	Ángulo de refracción
Azul	430	1,5514	27,12°
Verde	500	1,5445	27,25°
Amarelo	590	1,5392	27,35°
Vermello	650	1,5368	27,39°

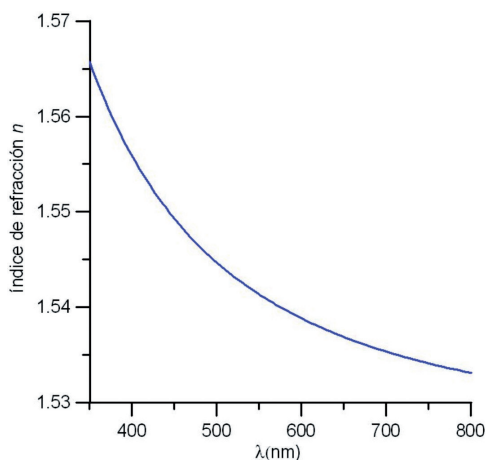


Figura 6: Variación do índice de refracción n do vidro crown coa lonxitude de onda λ .

Como se pode ver, cando a luz pasa do azul (430 nm) ao vermello (650 nm) o índice de refracción sofre unha variación de 1,5 centésimas, que produce un cambio de 16 minutos de arco no ángulo de refracción. Aínda que este cambio parece moi pequeno, é suficiente para separar liñas espectrais. Ademais, como na superficie de saída do prisma se produce outra nova refracción, o efecto acentúase. Se en lugar dun prisma se utilizan dous (espectrómetro de dobre prisma), a separación angular aumenta, pero se incrementan tamén as perdas de intensidade por reflexión.

OBTENCIÓN DE ESPECTROS MEDIANTE UNHA REDE DE DIFRACCIÓN

Unha rede de difracción está constituída por un número grande de fendas paralelas (liñas), coplanares, de largura moi pequena, cos seus centros aliñados. A separación a entre dúas fendas contiguas é constante e moito maior que a súa largura. A distancia a denomínase *constante da rede* (3-4). As redes utilizadas para a análise do espectro visible teñen unha constante dunhas poucas micras (μm).

Na Figura 7 móstrase o esquema dun espectrómetro de rede (5). A luz que provén da lámpada (Sol, estrela,...) cuxo espectro se quere estudar faise pasar por unha fenda limitadora. O observador mira ao través dunha rede, paralela á fenda de entrada e situada a unha distancia D da mesma. Na Figura 8 indícase un exemplo do que se observa a través da rede cando a fonte luminosa é un tubo de descarga de helio (He).

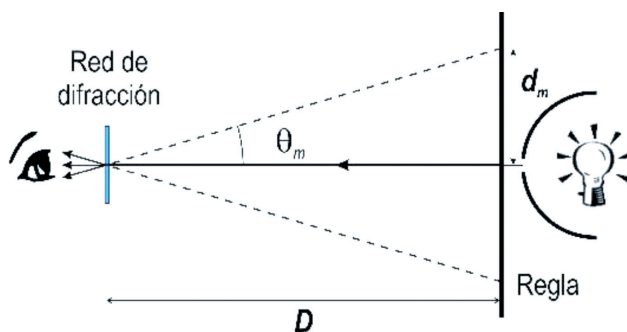


Figura 7: Esquema simplificado dun espectrómetro de rede.

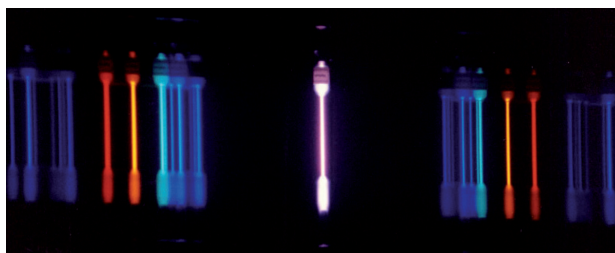


Figura 8: Espectro dun tubo de descarga de He obtido ao través dunha rede.

A parte central do espectro corresponde á orde cero da figura de difracción e é a imaxe directa do tubo de descarga. A dereita e esquerda vemos imaxes do tubo en diferentes cores que corresponden á primeira orde de difracción. Este primeira orde contén as liñas de emisión do espectro do He separadas unhas doutras. Se puidésemos estender a imaxe a dereita e esquerda, observaríamos máis ordes de difracción coas mesmas liñas, cada vez máis separadas entre si e de menor intensidade. Estas ordes corresponden ao que se denomina *máximos principais de difracción*. Na Figura 9 pode verse un esquema da distribución de intensidade debida á difracción producida por unha rede para unha soa lonxitude de onda. Os picos máis pronunciados son os máximos principais que representan as ordes de difracción anteriormente mencionadas. Os picos pequenos que aparecen entre medias corresponden a máximos secundarios, cuxa intensidade diminúe enormemente cando aumenta o número N de fendas iluminadas.

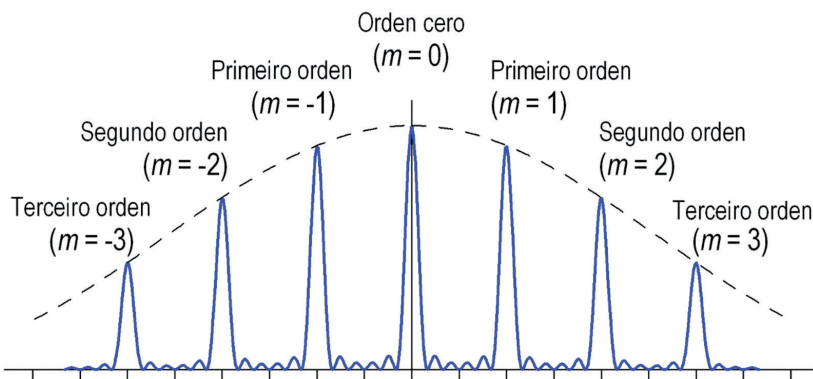


Figura 9: Perfil de intensidade producida por unha rede de difracción para luz monocromática (a liña de trazo discontinuo corresponde ao perfil da difracción dunha soa fenda da rede).

A teoría da difracción, baseada no principio de propagación de Huygens-Fresnel, proporciona o perfil de intensidade e as posicións angulares dos seus máximos principais¹. Estas obedecen a seguinte expresión:

$$\text{sen } \theta_m = m \frac{\lambda}{a} \quad ; \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2)$$

¹ Os interesados no desenvolvemento matemático da difracción da luz poden consultar, por exemplo, o libro "Óptica" de E. Hecht. Ed. Addison-Wesley Iberoamericana, 2000.

onde θ_m é o ángulo de difracción correspondente ao máximo principal de orde m para a lonxitude de onda λ (ver Figura 7).

Como fixemos anteriormente, na Táboa 2 móstrase un exercizo de aplicación da difracción producida por unha rede para as mesmas lonxitudes de onda do espectro visible que no caso da Táboa 1. Utilizouse unha rede de $a = 3,33 \mu\text{m}$, que corresponde a 300 liñas(fendas)/mm.

Táboa 2: Separación angular para os máximos de orde 1 e 2

Cor	λ (nm)	$\theta_{m=1}$	$\theta_{m=2}$
Azul	430	7,41°	14,95°
Verde	500	8,63°	17,46°
Amarelo	590	10,20°	20,73°
Vermello	650	11,24°	22,95°

Neste caso, para unha variación de 220 nm na lonxitude de onda, hai 4° de variación no ángulo de difracción na primeira orde e 8° na segunda. Como se pode ver, agora o cambio é 15 veces maiores na primeira orde e 30 veces no segundo, con relación ao prisma. Porén, hai que sinalar que a intensidade que se obtén á saída dun prisma é moito maior que a que se obtén cunha rede de difracción. Dependendo do espectro concreto a estudar, utilízase un dispositivo de prisma ou de rede.

Por outra banda, para poder separar liñas moi próximas, como por exemplo o par léxico amarelo do sodio, temos que ter en conta o *poder de resolución* dos dispositivos. O poder de resolución R está definido como o cociente entre a lonxitude de onda λ e a diferenza mínima $\Delta\lambda_{\min}$ entre lonxitudes de onda que poden ser separadas, que, no caso das redes, está relacionado coa orden m de difracción e o número N de fendas iluminadas:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda_{\min}} = mN \quad (3)$$

Co mesmo número N de fendas iluminadas, cando aumenta a orde m de difracción diminúe a separación mínima $\Delta\lambda_{\min}$ que se pode resolver. Agora ben, como diminúe a intensidade ao aumentar m , é preciso buscar un equilibrio entre o aumento do poder de resolución (efecto que favorece a observación) e a diminución da intensidade (efecto que a limita).

Coa axuda dunha cámara dixital e colocando xusto diante do seu obxectivo unha rede de difracción dunhas 500 liñas/mm pódense obter os espectros do Sol, da Lúa e, con axuda dun telescopio, de Xúpiter. Marte... Na Figura 10 amósanse os espectros do Sol e da Lúa. Como se pode ver, ambos espectros son semellantes, o que quere dicir que se trata da mesma fonte luminosa. A Lúa reflecte esencialmente a luz que lle chega do Sol, pois non ten luz propia. (No caso de acadar espectros de planetas pódese comprobar que son similares ao do Sol). Nestas imaxes non se observan as liñas negras de Fraunhofer porque o poder de resolución do sistema de detección non é suficiente para esta observación.

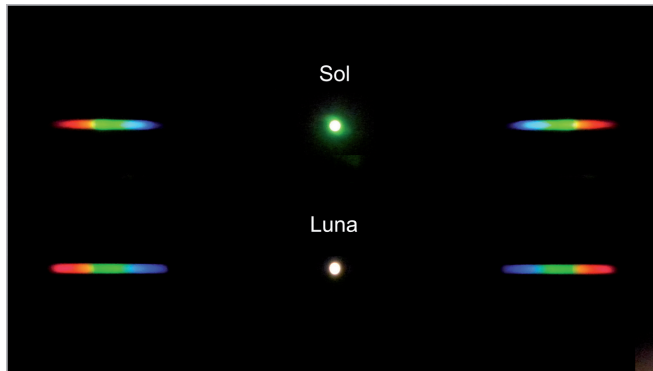


Figura 10: Espectros do Sol e a Lúa, obtidos cunha cámara dixital e unha rede de difracción de 500 liñas/mm.

DESCRIPCIÓN DO NOSO ESPECTROSCOPIO

Nun extremo dun tubo cilíndrico colocamos unha fenda estreita (de aproximadamente 0,2 mm), construída con dúas follas de afeitar xustapostas montadas sobre o marco dunha diapositiva (ver Figura 11). A continuación colócase unha lente converxente de 35 cm de distancia focal, co seu plano focal obxecto sobre o plano da fenda. Desta maneira, toda a luz que entra no tubo pola fenda, difractase e, despois de atravesar a lente, sae paralela ao eixe do sistema.



Figura 11: Fotografía da fenda de entrada utilizada no noso espectroscopio.

Trala lente, unha rede dunhas 500 liñas/mm recolle a luz que incide sobre ela perpendicularmente e produce o fenómeno da difracción (ver Figura 12). Como todos os raios (luz branca) inciden co mesmo ángulo sobre a rede, todos os raios difractados da mesma lonxitude de onda (mesma cor) saen paralelos. Se achegamos o noso ollo á rede, vemos a dereita e a esquerda as ordes de difracción que caracterizan os espectros así obtidos. A lente converxente do noso cristalino forma parte do sistema óptico: todos os raios que chegan a el paralelos acadan un mesmo punto na retina (ver de novo o esquema da Figura 12). Na Figura 13 pode verse o espectroscopio montado cunha lámpada.

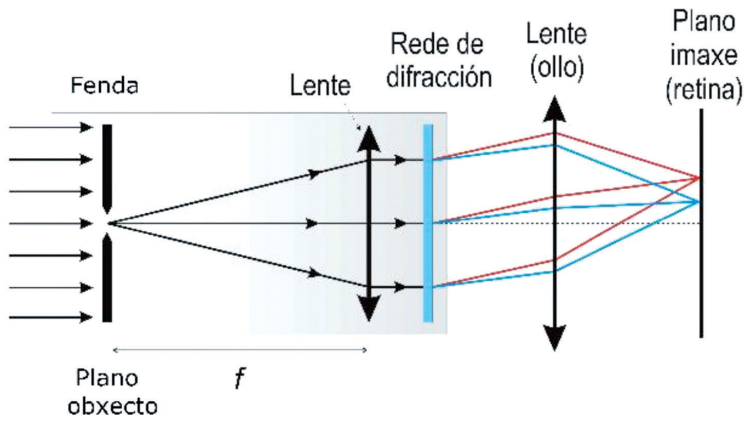


Figura 12: Esquema do noso espectroscopio.

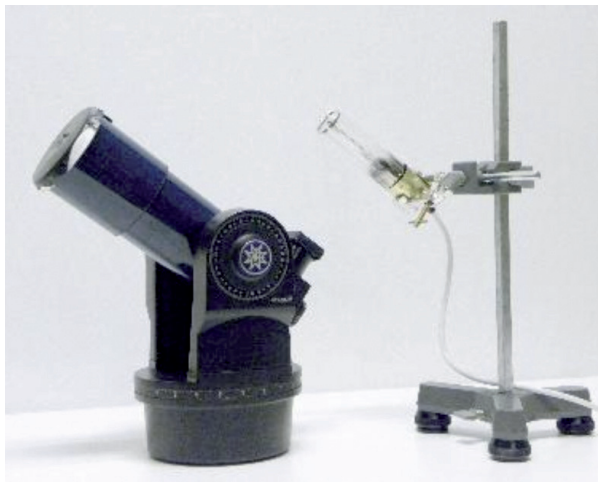


Figura 13: Espectroscopio.

Para poder determinar as lonxitudes de onda das liñas espectrais o primeiro que temos que coñecer é a largura da fenda de entrada e o número de liñas por unidade de lonxitude da rede. No apartado seguinte indicamos como se pode abordar estas determinacións, o que constitúe o calibrado do espectroscopio.

O CALBRADO DO ESPECTROSCOPIO

1. Determinación da largura da súa fenda de entrada:

Para determinar a largura b da fenda dispoñemos dun pequeno láser de He-Ne vermello, de lonxitude de onda perfectamente coñecida ($\lambda = 632,8$ nm), e procedemos como se indica na Figura 14 [6].

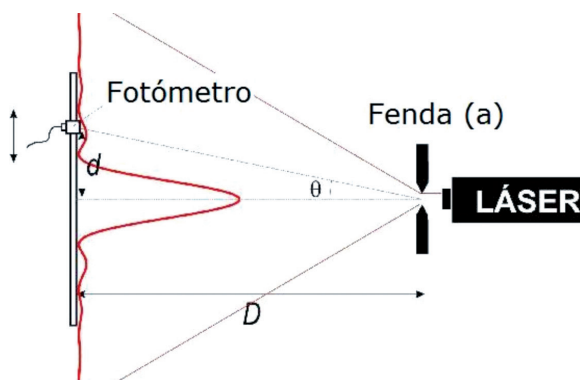


Figura 14: Esquema da montaxe experimental para a determinación da largura b da fenda de entrada do espectroscopio.

Sobre a fenda incide perpendicularmente o raio láser e recóllese o espectro de difracción que se mostra na Figura 15 sobre una pantalla situada a unha distancia D da mesma.

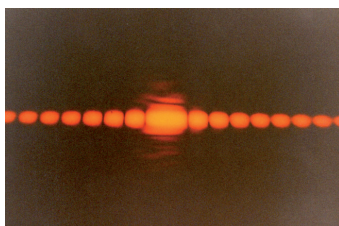


Figura 15: Espectro de difracción producido por una fenda de largura b .

Os mínimos de difracción de orde m aparecen a distancias d_m que cumpren as seguintes relacións²:

$$\text{sen } \theta_m = m \frac{\lambda}{b} \Rightarrow b = m \frac{\lambda}{\text{sen } \theta_m} \quad (m = \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (4)$$

Da xeometría da Figura 14 dedúcese o valor do $\text{sen } \theta_m$:

$$\text{sen } \theta_m = \frac{d_m}{\sqrt{D^2 + d_m^2}} \Rightarrow b = m \lambda \frac{\sqrt{D^2 + d_m^2}}{d_m} \quad (5)$$

Para $m = 1$, temos:

$$b = \lambda \frac{\sqrt{D^2 + d_1^2}}{d_1} \quad (6)$$

No noso caso, $D = 1$ m, $d_1 = 3,16$ mm e $\lambda = 632,8$ nm, co que a largura b da fenda resulta ser de 200 μm .

Ademais, para garantir o paralelismo dos bordes da fenda, como a súa altura é de uns 2 cm, debe facerse esta determinación a varias alturas (arriba, en medio e abaixo) para corrixir o posible defecto.

² Ver o libro “Óptica” de E. Hecht, anteriormente mencionado.

2. Determinación do número de liñas por milímetro da rede de difracción:

Na mesma montaxe da Figura 14, substitúese a fenda pola rede. Sobre a pantalla obsérvase o espectro de difracción que se indica na Figura 16. Os puntos brillantes corresponden aos máximos principais de difracción. As súas distancias d_m ao punto central da pantalla verifican a ecuación (2). Do mesmo xeito calcúlase a a partir da xeometría do sistema (6). Para $D = 1$ m, $d_1 = 33,35$ cm e $\lambda = 632,8$ nm, a resulta ser de $2 \mu\text{m}$, ou o que é o mesmo, a rede ten 500 liñas/mm.

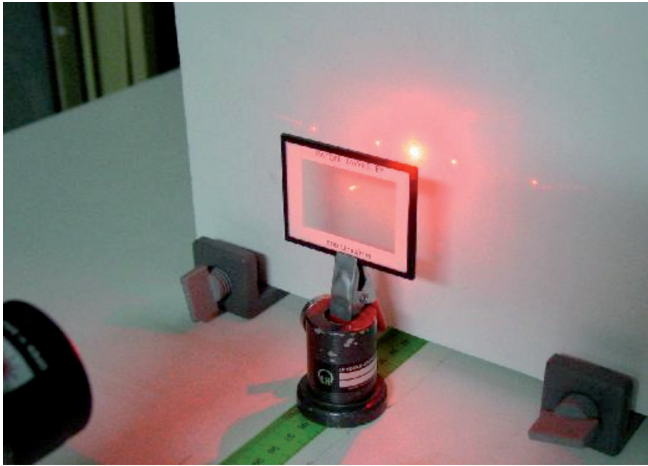


Figura 16: Espectro de difracción producido por una red.

3. Determinación do poder de resolución:

Por outra parte, para determinar o *poder de resolución* do espectroscopio precisamos coñecer o número N de fendas iluminadas, ver ecuación (3). No noso caso particular, para calcular N , número de fendas iluminadas polo máximo central do espectro de difracción producido pola fenda de entrada, temos que ter en conta como é este espectro. A mancha central ten a distribución que se indica na Figura 17. Corresponde a unha función sinc^2 .

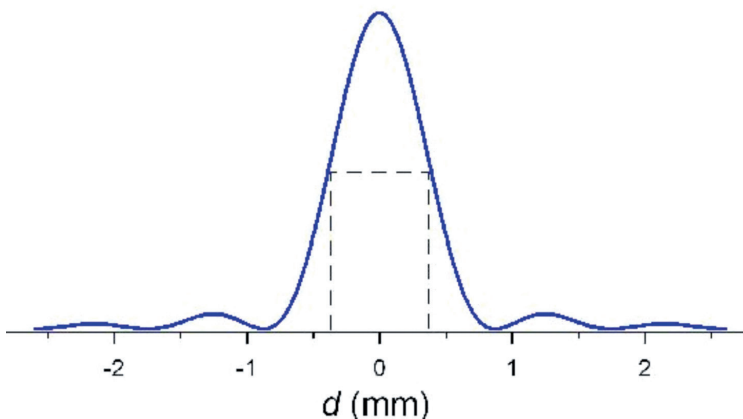


Figura 17: Distribución de intensidade producida por unha fenda.

Como non é unha función de tipo rectángulo, é dicir, a rede non recibe a mesma intensidade de luz en todos os seus puntos, temos que elixir un criterio no que garantamos que a iluminación da rede é practicamente uniforme. Entre os posibles criterios eliximos o de tomar en consideración soamente os puntos do máximo central cuxa intensidade é igual ou superior ao 50% do valor máximo. Nestas condicións, a largura do feixe que cumpre este requisito é de 0,77 mm e, polo tanto, o número N de fendas iluminadas é de 385. Substituíndo este valor na ecuación (3), o poder de resolución do noso espectroscopio de rede na primeira orde de difracción ($m = 1$) resulta ser de 385. É dicir, para $\lambda = 500$ nm a separación mínima $\Delta\lambda_{\min}$ que podemos resolver é de 1,3 nm. Non podemos resolver o dobrete amarelo do sodio, cuxas liñas están separadas 0,6 nm ($\lambda_1 = 589,0$ nm e $\lambda_2 = 589,6$ nm), pero sí podemos ver liñas espectrais cuxa separación en lonxitudes de onda sexa superior ao nanometro.

OBTENCIÓN DE ESPECTROS

Ademais de facer a observación a simple vista, é conveniente tomar fotografías dos espectros cunha cámara dixital; precisándose que permita o uso manual das súas funcións (enfoque, apertura, velocidade de obturación, etc...). No noso caso utilizamos unha cámara Nikon Coolpix P90. Na Figura 18 pode verse unha composición cos espectros obtidos para (de arriba a abaixo) o Sol, un tubo de descarga de hidróxeno, un tubo de helio, outro de sodio e dous láseres de He-Ne, un vermello (632,8 nm) e o outro verde (543,5 nm).

Na parte esquerda da figura fixéronse coincidir a orde $m = 0$ de todas as fontes luminosas. Na parte dereita poden observarse os espectros correspondentes á orde $m = 1$. No espectro do Sol obsérvanse unhas liñas negras, as liñas de Fraunhofer, que se corresponden con algunhas liñas de emisión da serie de Balmer do átomo de hidróxeno (α e β) e co dobrete amarelo do sodio.

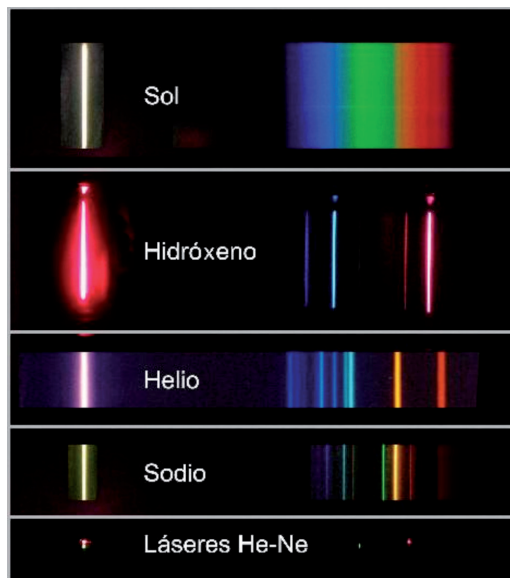


Figura 18: Espectros do Sol, os tubos de descarga de hidróxeno, helio e sodio e de dous láseres de He-Ne (vermello e verde), obtidos cunha cámara dixital e o noso espectroscopio.

Unha vez realizadas as fotografías dos espectros observados ao través do espectroscopio, pódese levar a cabo a análise e posterior interpretación dos mesmos. Para iso é preciso o emprego de software de edición e de análise e procesamento de imaxes para a obtención de curvas de intensidade ao longo de calquera segmento seleccionado. No noso caso, utilizamos PhotoShop para a edición e MatLab para o procesamento, aínda que o emprego de software gratuito é unha opción igualmente válida³. Na Figura 19 representamos os perfís de intensidade dos tres espectros mencionados no párrafo anterior. Poden verse as coincidencias das liñas de absorción (fendeduras) no espectro do Sol coas liñas de emisión (picos) dos espectros do hidróxeno e do sodio.

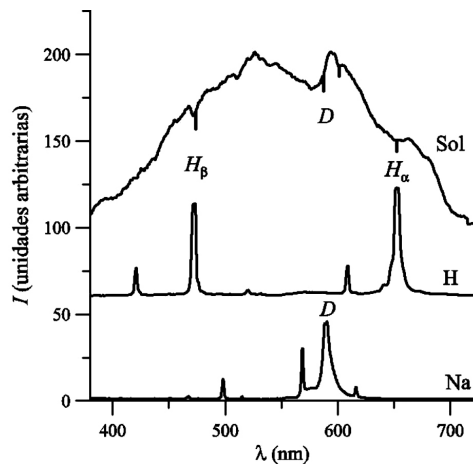


Figura 19: Perfís de intensidade dos espectros do Sol, do hidróxeno e do sodio.

CONCLUSIÓNS

A construción do espectroscopio, así como os experimentos cualitativos e cuantitativos que propoñemos, son de fácil realización e poden ser levados a cabo no marco do Ensino Secundario (fundamentalmente, no Bacharelato) e, por suposto, nos cursos universitarios introductorios de Física [5], [6].

Pódese poñer en evidencia que grazas á espectroscopía temos podido identificar os átomos presentes nas atmosferas estelares, o que nos permite asegurar que a vida na Terra ten xurdido dos materiais estelares. Xa que logo, cando se di que *somos pó de estrelas*, o que queremos poñer de manifesto é que estamos constituídos polos mesmos átomos que teñen sido detectados no Universo.

O tema deixa moitas portas abertas para a motivación dos estudantes pola Ciencia. A espectroscopía ten sido fundamental no avance da Astrofísica, pois grazas aos seus resultados se teñen podido determinar o movemento das galaxias e das nebulosas, a constante de Hubble,...., e un longo etcétera.

³ Outros programas para o procesamento de espectros son: SciLab, Visual Spec, SpcAudace, SpIRIS,...

BIBLIOGRAFÍA

1. Sir Isaac Newton: *Óptica o Tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz* (Introducción, Traducción, Notas e Índice Analítico de Carlos Solís). Ediciones Alfaguara, S.A., Madrid (1977). ISBN: 84-204-0304-0.
2. Antonio Casares Rodríguez: *Tratado práctico de Análisis Químico de las aguas minerales y potables*. Ángel Calleja (editor), Madrid (1866).
3. E. Hecht: *Óptica*. Capítulos 4 y 10. Ed. Addison-Wesley Iberoamericana, S.A., 3ª edición, Madrid (2000). ISBN: 84-7829-025-7.
4. C. Carreras Béjar, A. Fernández-Rañada, J.J. García-Sanz y M. Yuste Llandres: *Física Básica* 2. Capítulo 18. Alianza Editorial, Serie: El libro de Bolsillo, nº 1823 (Madrid, 1997). ISBN: 84-206-0823-8.
5. C. Carreras y M. Yuste: *Una forma sencilla y natural de iniciar a los estudiantes en la Física Cuántica: obtención y análisis de algunos espectros atómicos*. *Óptica Pura y Aplicada*, **21**(2), 167-177 (1988). ISSN: 0030-3917.
6. Carmen Carreras Béjar: *El trabajo experimental en la enseñanza de la Física*. *Revista Española de Física*, **20**(2), 53-61 (2006). ISSN: 0213-862X.

Carmen Carreras Béjar é profesora titular na Facultade de Ciencias (Sección Físicas) da UNED. As súas áreas de investigación son a Óptica e a Innovación Educativa. É directora da revista de divulgación científica **100cias@uned** da UNED. Entre outras posúe as seguintes distincións: Medalla de Honor da Facultad de Ciencias da UNED en 2001, Premio de Ensinanza da Real Sociedad Española de Física (RSEF) en 2005 e Medalla LAPEN (Latin-american Physics Education Network) en 2009. É coautora do libro *Física Básica* (Alianza Editorial, Madrid 1993). É vicepresidenta do Grupo Especializado de Mulleres en Física, da Real Sociedade Española de Física.

Manuel Yuste Llandres é catedrático na Facultade de Ciencias (Sección Físicas) da UNED. Ten traballado en Física Atómica, Óptica e Innovación Educativa. É coautor do libro *Física Básica* (Alianza Editorial, Madrid 1993). Moi implicado dende hai moitos anos no ensino da Física, ten sido recoñecida a súa labor educativa, entre outras, coa Medalla LAPEN (Latin-american Physics Education Network) e o Premio de Ensinanza da RSEF en 2009.

Juan Pedro Sánchez Fernández é Físico, Profesor Asociado na Facultade de Ciencias (Sección Físicas) da UNED. Os seus temas de interese son o deseño, a montaxe e a posta a punto de laboratorios de Física para a o ensino a distancia, nas súas diferentes modalidades: presenciais, virtuais e remotos.