

Espetrómetros Óticos: de Adam Hilger (1904) aos Sarspec/IST (2020)

[Moisés Piedade](#)¹, [Gonçalo Tavares](#)², [João Mendanha Dias](#)³

1- Diretor do Museu Faraday, INESC-ID; 2- Prof. DEEC/IST, INESC-ID; 3- Prof. DF/IST, IPFN/GoLP

Neste texto discute-se o espetrómetro ótico que faz parte da coleção do Museu Faraday e que foi desenvolvido em 1904 pelo fabricante inglês Adam Hilger. Refere-se também os moderníssimos espetrómetros desenvolvidos no IST, a partir de 2011, com o apoio da ANI, [Agência de Inovação](#), e a colaboração entre o [IST](#), o [INESC-ID](#) e a empresa portuguesa [Sarspec, Lda](#). Estes últimos espetrómetros, que foram desenvolvidos e são produzidos em Portugal, têm um elevado desempenho e são extremamente competitivos no mercado internacional.

A empresa inglesa Adam Hilger¹ produziu espetrómetros óticos desde 1904, ano em que passou a sociedade limitada. De 1937 a 1945 a empresa foi incorporada na [Cambridge Instrument Co. Ltd.](#) (1937-1945) mas manteve o nome original.

O excelente trabalho de Adam Hilger, nas aplicações da ótica, foi relembrado pela revista *Natura* “*By the death of Adam Hilger, which took place on April 23, the physical sciences, and especially astronomical physics, have suffered a loss which cannot be immediately made good. Standing in the front rank of practical opticians, he did much to promote scientific progress along various lines, his thorough scientific training enabling him to undertake optical work of the highest character*”. Também a revista *Royal Society Academy of Astronomy* [relembrou o papel de Adam Hilger](#).

Espetrómetros Óticos

Quando se considera a radiação luminosa há que ter em conta um conjunto de variáveis que a caracterizam, e que possam ser medidas, ver por exemplo [1]. Para isso usam-se vários equipamentos como o espetroscópio, o espetrómetro e o espetrógrafo.

O instrumento mais simples é o espetroscópio ótico pois decompõe a luz nas suas componentes espectrais e permite que o utilizador veja logo o espetro da radiação. Os espetrómetros óticos funcionam na banda de comprimentos de onda visível pelos humanos² (390 nm a 780 nm)³.

Com certeza que já observámos um espetrómetro ótico em ação. O arco íris é um fenómeno natural de decomposição espectral da luz do Sol nas suas diferentes componentes espectrais. Esta decomposição é feita por minúsculas gotas de água, quase esféricas, em que, cada uma faz o papel de um [micro-espetroscópio ótico](#) [2].

Já os espetrómetros, considerados como aparelho de medida, têm como objetivo decompor uma radiação luminosa (luz incidente) nas componentes de diferentes comprimentos de onda (ou frequências) existentes nessa radiação, de forma que essas componentes se tornem separáveis e cuja intensidade possa ser medida.

¹ - A empresa foi fundada em 1874 por Adam Hilger que faleceu em 1897, num acidente de bicicleta, mas o irmão Otto Hilger continuou com a empresa. Em 1898, Frank Twyman entrou na empresa dirigida por Otto Hilger, mas este viria a falecer em 1902 ficando Twyman como gestor até 1904, ano em que a empresa passou a sociedade limitada.

² - Esta indicação da banda visível dos humanos é obviamente feita sobre uma média de sensibilidade espectral de um conjunto grande de indivíduos, pois cada um vê de forma diferente. Também acomoda o facto de à noite a curva da sensibilidade espectral humana se deslocar cerca de 55 nm para o lado dos comprimentos de onda maiores.

³ - Ou 3900 Å - 7800 Å. Å, (Angström), é a unidade de comprimento de onda da luz e equivale a 0,1 nm.

Os aparelhos que registam graficamente o espectro de radiação fora do visível (ultravioleta ou radiação X, etc.) designam-se por espectrógrafos.

Um processo usual para decompor a luz é fazer com que atravesse um meio dispersivo (onde o índice de refração depende do comprimento de onda da luz) fazendo com que o caminho seguido pelos raios refratados, com diferentes comprimentos de onda, seja diferente e cheguem a diferentes regiões do espaço. Os prismas óticos que são fabricados com vidros de elevado índice de refração realizam esta decomposição espectral da luz.

Outro processo usual para decompor uma radiação luminosa consiste no uso de orifícios ou de redes de difração, com malhas suficientemente pequenas para provocarem a interferência múltipla das ondas de luz.

Através desta decomposição espectral da luz é possível obter alguma informação sobre a constituição química da substância que originou essa luz ou a composição química de um meio que foi atravessado por uma luz cujo espectro seja conhecido.

As aplicações dos espectrómetros são muito diversificadas, desde análise de materiais, de fluidos e de gases. O espectrómetro permite investigar a estrutura dos átomos e determinar os átomos de diferentes elementos que estão presentes numa dada substância. Esta capacidade levou os espectrómetros a serem, desde muito cedo, usados como uma ferramenta de investigação criminal [1,2] entre muitas outras aplicações.

Os cientistas químicos usam espectrómetros para determinar as constituintes de moléculas e os astrónomos usam-nos para determinar os constituintes de estrelas que estão a milhões de anos-luz de distância da Terra. Prova disso é o facto de, também no início do século, enquanto este espectrómetro era comercializado pela companhia Adam Hilger, em 1927-29, [Edwin Hubble](#) (1889-1953) e [Georges Lemaître](#) (1894-1966) descobrem, usando dados de espectrómetros obtidos em observações astronómicas, que o desvio para o vermelho das riscas espectrais de absorção, H e K, do Cálcio, proveniente das galáxias distantes, era diretamente proporcional à sua distância em relação à Terra, “A célebre lei dos desvios para o vermelho” (Fig.1) em que o desvio é explicado pelo efeito Doppler⁴. Foi este facto que levou à conclusão de que o universo se está a expandir em todas as direcções e à teoria do *Big Bang* introduzida por Georges Lemaître, teoria que foi batizada em 1949 pelo astrónomo [Fred Hoyle](#) (1915-2001).

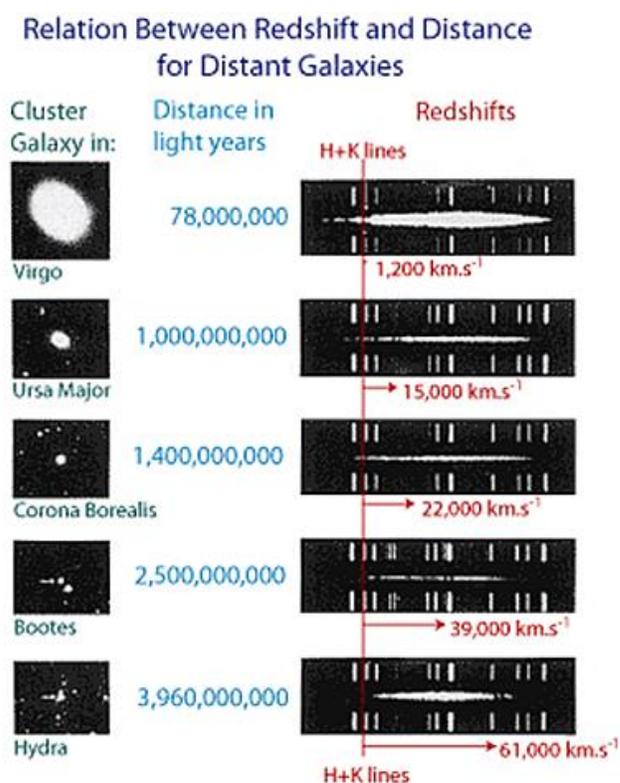


Fig.1: Relação entre o desvio para o vermelho e a distância nebulosa extragaláctica. As setas indicam os desvios para as linhas H e K do Cálcio.

⁴ - O efeito [Doppler](#) foi investigado pelo cientista austríaco Christian Doppler (1803-1853). Segundo Doppler a frequência observada de uma onda depende da velocidade relativa da fonte e do observador.

Refração da luz num prisma

Na interface entre dois meios óticos existe reflexão da luz e refração. [Sir David Brewster](#) (1781–1868) descobriu que para um dado comprimento de onda da luz incidente, o raio refletido terá duas componentes de polarização, como é usual, mas para o ângulo de Brewster, α_B , a luz refletida só terá a componente de polarização vertical à superfície de separação dos dois meios. Este ângulo é dado por:

$$\tan(\alpha_B) = \frac{n_2}{n_1}$$

Em que n_1 e n_2 são, respetivamente, os índices de refração dos meios 1 e 2.

Esta propriedade é usada para fazer polarizadores de luz e, neste caso, o ângulo de refração será dado por: $90^\circ - \alpha_B$. Na reflexão, a não transmissão de uma componente da polarização da luz significa mais intensidade da luz refratada e isso pode influenciar a intensidade das correspondentes componentes espectrais.

A refração da luz na passagem de um meio para outro obedece à lei de [Willebrord Snell](#) (1580-1626) proposta em 1621. Segundo Snell o ângulo da luz incidente com a normal à superfície de separação dos dois meios e o ângulo do raio refratado estão relacionados por:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Os prismas de materiais com índice de refração elevado são normalmente dispersivos, isto é, o índice de refração depende do comprimento de onda da luz incidente. Assim, o desvio angular das diferentes componentes espectrais da luz incidente será diferente.

Por exemplo, no caso de um prisma triangular de vidro pesado em que o índice de refração depende do comprimento de onda da luz, com base em forma de triângulo isósceles, a luz é decomposta em raios diferentes de acordo com o comprimento de onda, ver Fig. 3.

Apenas como exemplo, num dado prisma, o índice de refração para a luz vermelha pode ser de 1,51 e para a luz violeta ser de 1,53. Daqui resulta, como se indica na Fig.3, a separação angular da luz com os diferentes comprimentos de onda, nomeadamente aos extremos correspondentes ao vermelho e ao violeta.

No caso de a luz branca incidir com um ângulo de 50° relativamente à normal da superfície, o ângulo do raio refratado (de entrada no prisma), seria de $30,48$ graus para a componente vermelha da luz e seria de $30,04$ graus para a componente violeta da luz. Na saída do prisma, o ângulo de desvio do raio de luz vermelha seria de $48,07$ graus e de $49,82$ graus para a luz violeta, relativamente à normal da superfície de saída do prisma. Para um raio de luz verde (com comprimento de onda médio entre o do raio vermelho e o do raio violeta) o desvio da direção da luz verde, relativamente à direção inicial, seria de α_{d1} dentro do prisma e de α_{d2} na saída do prisma. Para um dado prisma triangular com ângulo β e índice de refração, n , o desvio mínimo seria [4]:

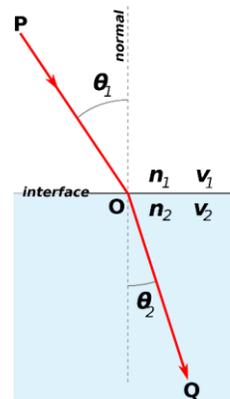


Fig. 2: Ilustração da lei de Snell.

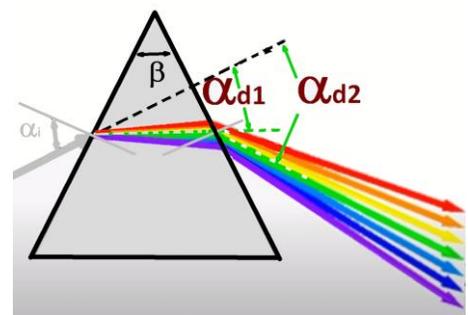


Fig. 3: Prisma triangular e refração da luz na superfície de entrada e na de saída.

$$\alpha_{d2} = 2 * \arcsin \left[n * \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] - \frac{\beta}{2}$$

Para um prisma com $n = 1,5$ e $\beta = 60^\circ$, o desvio mínimo seria de $67,18^\circ$.

Os prismas de desvio mínimo constante têm geometrias que conduzem à seguinte propriedade: para um dado comprimento de onda da luz incidente existe um ângulo de incidência α_i no prisma que conduz a um raio refratado de saída cuja direção faz um ângulo fixo mínimo com o raio incidente.

Nos prismas de desvio constante, a luz sai separada em diferentes posições, mas rodando o prisma (variando o ângulo de incidência α_i) há um raio de luz que emerge do prisma com um desvio constante, o que possibilita a realização de espetrómetros que podem ser mecanicamente calibrados e precisos.

Esta propriedade permite construir espetrómetros dotados de objetiva fixa e de tubos oculares fixos, o que lhes dá uma enorme robustez mecânica e ótica ao equipamento. O prisma terá um eixo de rotação que permite modificar o ângulo α_i de modo ao raio refratado sair com o ângulo pretendido, o que só ocorre num dado comprimento de onda.

Com um prisma triangular, como o prisma de [Ernst Abbe](#) (1840-1905), um dos proprietários da empresa Carl Zeiss AG, e que foi uma das personalidades mais influentes na criação de novos dispositivos óticos, o ângulo de saída da luz é de 60° relativamente ao ângulo de incidência, Fig. 4a).

Um dos primeiros medidores do índice de refração foi o refratómetro ótico proposto em 1802 por [William Hyde Wollaston](#)⁵ (1766-1828), e que teve uma implementação prática e aplicação industrial generalizada por [Ernest Abbe](#). Este instrumento, muito simples, Fig. 4b), permite medir facilmente o ângulo de reflexão total de um material transparente e este ângulo está relacionado com o índice de refração do material. Por sua vez, em sumos de frutas, este índice permite determinar o teor de açúcares (em unidades Brix⁶) segundo a metodologia proposta por [Adolph Brix](#) (1798-1870).

Os espetrómetros usam prismas de desvio mínimo constante, mais evoluídos, nomeadamente os que foram desenvolvidos em 1898 pelos franceses [Philippe Pellin](#) (1847-1923) e [André Broca](#) (1863-1925). No artigo publicado em janeiro de 1889 estes cientistas mostraram várias hipóteses de construir e tirar partido destes prismas.

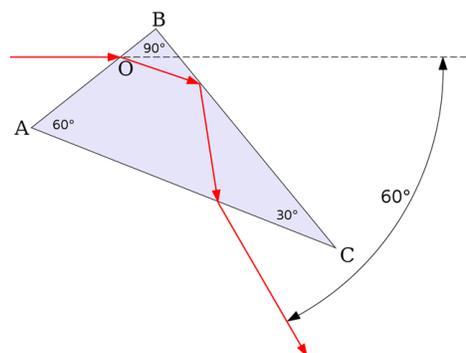


Fig. 4: a) - Prisma de Ernest Abbe;
b) - Aplicação num refratómetro moderno.

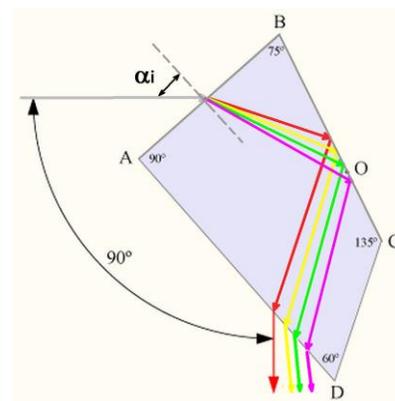


Fig. 5: Prisma de Pellin-Broca.

⁵ - Wollaston fez muitos trabalhos científicos com a platina. Acabou por descobrir o paládio em 1802 e o ródio em 1804. Wollaston mostrou que a eletricidade estática era igual à produzida pela nova pilha de Volta e apresentou na [Royal Institution](#) uma proposta de um motor elétrico (que não funcionou), 10 anos antes do motor que Faraday propôs e que funcionou.

⁶ - 1 Brix corresponde a 1 grama de açúcar em 100 g da solução.

O prisma pode ser feito numa peça única ou ser feito por 3 prismas, mais simples, colados. Na Fig.5 pode ver-se a geometria deste prisma que faz a separação das componentes da luz mas mantém o ângulo de 90° de saída do prisma relativamente ao feixe incidente, neste caso para o raio de luz vermelho.

Os espectrômetros óticos Adam Hilger

A propriedade de desvio constante permite realizar espectrômetros mecanicamente robustos em que a única parte móvel é uma mesa giratória em que se coloca o prisma e com a qual se procura que o raio refratado faça um dado ângulo com o raio incidente.

Esta mesa rotativa é colocada entre os tubos da objetiva e da ocular. À medida que a mesa roda, o prisma permite que as diferentes linhas espectrais fiquem no campo da ocular.

Associando um cilindro calibrado ao mecanismo de rotação da mesa este cilindro pode mostrar diretamente o comprimento de onda da risca espectral observada.

No catálogo de Adam Hilger de setembro de 1912 podemos ver a descrição do espectrômetro, Fig.6, produzido em 1904, já pela empresa Adam Hilger Ltd. O espectrômetro foi baseado no prisma representado na Fig. 5, que conduz a um desvio constante da luz de 90° e, por isso, os braços da ocular e da objetiva fazem entre si um ângulo fixo de 90° . Na fig. 7 pode ver-se em detalhe o trajeto de um raio de luz verde e a indicação de comprimento de onda na escala rotativa associada à mesa giratória onde o prisma está montado.

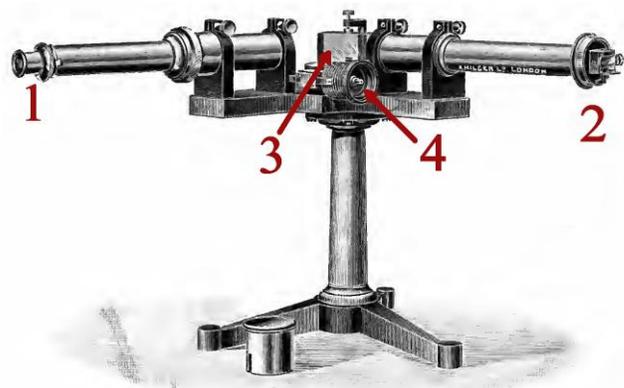


Fig. 6: Espetrômetro de Adam Hilger
1- Ocular; 2- Objetiva; 3 - Prisma rodável;
4- Escala de comprimentos de onda.

Os prismas mais usuais dos espectrômetros Adam Hilger eram feitos de vidros densos, numa única peça, com índice de refração de 1,64 ou 1,65 e cobriam o espectro de passagem de comprimentos de onda entre 385 nm a 800 nm. Todavia, foram fabricados prismas de quartzo que cobriam o espectro de 385 nm a 5000 nm, cobrindo uma banda de comprimentos de onda no infravermelho (não visível) mas que permite sensibilizar películas fotográficas.

Espectrômetros baseados em rede de difração

A realização de redes de difração com malhas muito apertadas e com alta precisão foi feita, pela primeira vez, em 1888 pelo físico dos EUA [Henry Rowland](#) (1841-1901). Até então as redes de difração mais usuais eram feitas por linhas paralelas de fios esticados que partiam a luz em vários feixes paralelos provocando a difração.

[Mesmo antes de Rowland](#) há trabalhos com algum sucesso de gravação de linhas em

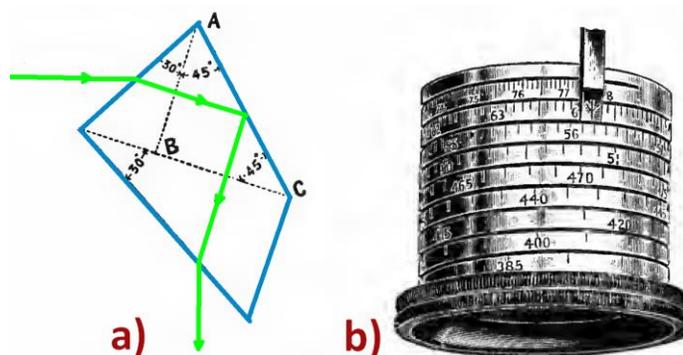


Fig. 7: Partes do espectrômetro Adam Hilger
a) - Prisma de Pellini-Broca; b) - Indicador de comprimento de onda.

materiais que conseguiam uma boa resolução. Mas estes métodos tinham resolução insuficiente para muitas aplicações e Rowland estudou um processo de fazer riscos micro separados numa superfície metálica refletora, obtendo redes de difração com alta resolução.

Os especrómetros de difração produzidos por Adam Hilger foram baseados nas redes refletoras de difusão de Rowland.

Os especrómetros óticos baseados em redes de difração têm maior resolução do que os que são baseados em prismas de desvio constante, mas precisam de uma fonte luminosa mais intensa.

Atualmente conseguem-se obter círculos côncavos com redes de Rowland com mais de 3000 linhas por mm ($2,5 \mu\text{m}$) de separação, [ver este exemplo](#).

Acessórios dos especrómetros Adam Hilger

Os especrómetros Adam Hilger dispunham de um grande conjunto de acessórios. Na Fig. 8 ilustra-se, como exemplo, uma lente ocular com ajuste lateral de cortinas que permitiam escolher uma pequena zona do espetro impedindo a passagem de luz de riscas mais intensas e permitir observar riscas com menor intensidade. Alguns destes acessórios dispõem de um espelho orientável que permite focar uma fraca luz ambiente sobre a escala da lente ocular.

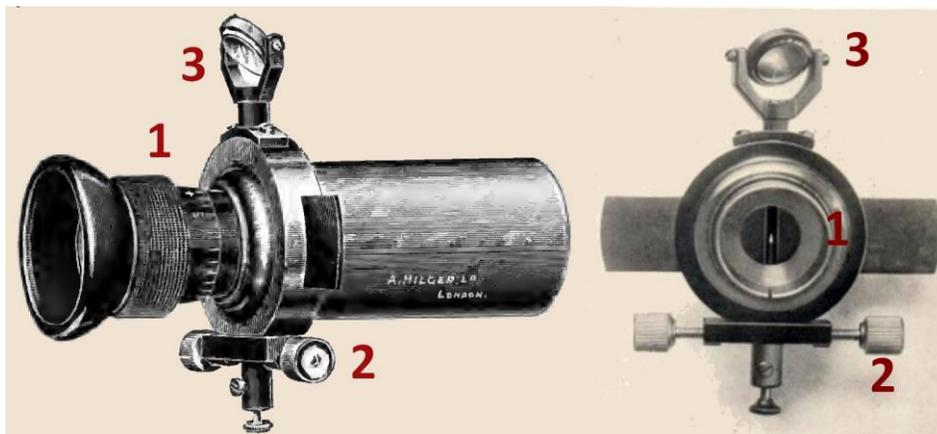


Fig. 8: Lente ocular com desvio lateral de precisão
1- Ocular; 2- Ajustador de cortina lateral; 3 - espelho de iluminação.

No vasto leque de acessórios disponíveis

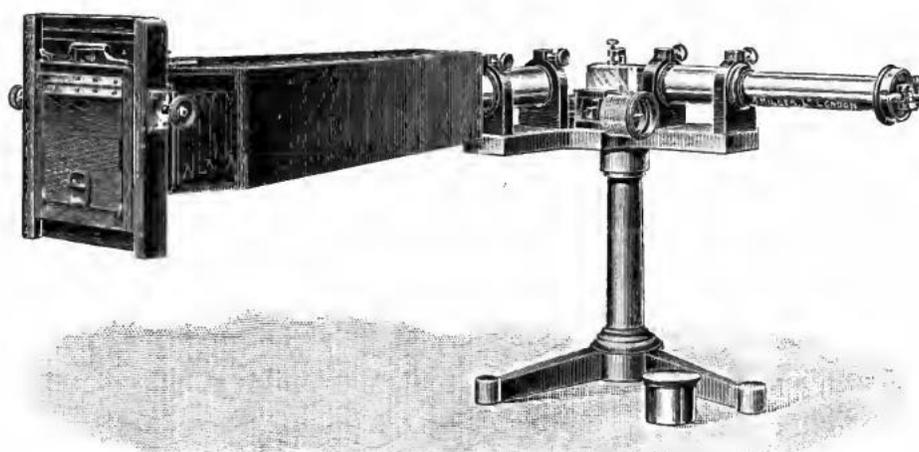


Fig. 9: Especrómetro Adam Hilger com câmara fotográfica.

no catálogo de 1913, já existia uma câmara fotográfica com caixa de madeira e com dispositivo de focagem ajustável por fole de pano, Fig. 9. Já existia também uma tampa metálica para cobrir o prisma e permitir a passagem da luz para os tubos da objetiva e da ocular.

O espectrômetro Adam Hilger do IST

Quando em 2015 alguns voluntários do Museu Faraday (Moisés Piedade, Carlos Fernandes, Albano Santos e Jorge Amarante) começaram a procurar equipamentos antigos em vários sítios do IST encontraram um aparelho ótico esquisito na cave do Complexo Interdisciplinar. Acharam o equipamento ótico muito bonito, mas não sabiam qual era a sua finalidade.

Só em 2022 o aparelho veio para o Museu Faraday onde foi restaurado pelo Prof. Moisés Piedade em janeiro de 2023. O aparelho foi colocado na sala Newton do Museu, onde era costume gravar os Podcasts do Museu para a série [“110 anos do IST”](#).

Na gravação do [Podcast Quenotrão](#), em 10 de fevereiro de 2023, a Prof^a Isabel Cabaço⁷ reconheceu o espectrômetro, que terá pertencido ao Prof. Alves Marques (primeiro doutorado pelo IST, ver Podcast 18 [“O primeiro laser em Portugal”](#)), e disse que ele não estava completo pois faltava a lâmpada de arco voltaico e as lentes.

Este aparelho teria sido usado para caracterizar materiais a partir da chama de partículas lançadas sobre o arco voltaico que no plasma



Fig. 10: Museu Faraday Arco Voltaico em ação.

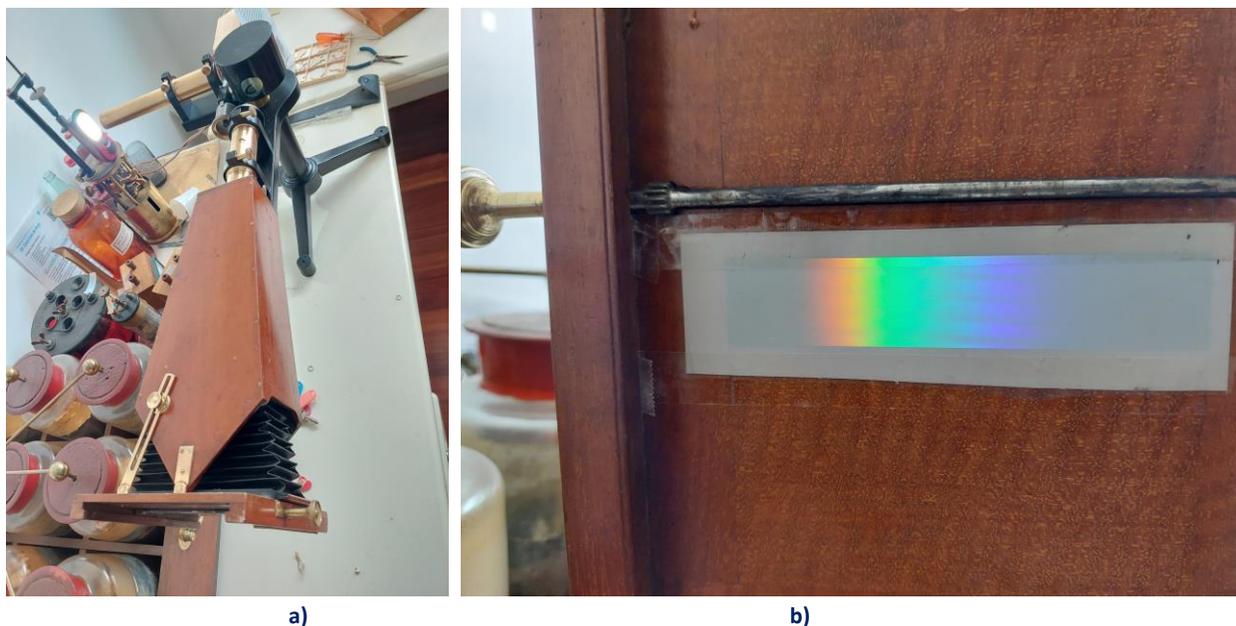


Fig. 11: a) - Espectrômetro de Adam Hilger e lâmpada de arco voltaico com elétrodos de carbono; b) - espectro obtido.

⁷ - Nota do Prof. Moisés Piedade. A Prof^a Isabel Cabaço deixou-nos em 10 de junho de 2023. Conheci melhor a Prof^a Isabel Cabaço na gravação do Podcast Quenotrão e o seu espírito humorado. Recordem no [Podcast](#) a sua opinião sobre o Prof. Alves Marques e como se vivia a investigação na área da Física, no IST, nos anos 70.

criado atinge temperaturas de dezenas de milhares de graus centígrados. O Prof. Moisés Piedade lembrou que no Museu Faraday tinha sido restaurada uma lâmpada de arco voltaico, Fig.10, e ela poderia ser usada para voltar a dar vida a este espectrómetro.

Na Fig. 11 pode ver-se o primeiro espectro obtido ainda sem as lentes, pela queima dos elétrodos de carbono no arco voltaico, que é um espectro praticamente de luz branca. Deitando limalhas de uma substância metálica na chama do arco é possível obter riscas correspondentes ao metal vaporizado. Mas o espectrómetro pode ser usado numa grande variedade de aplicações de análise de luz de fontes ou da luz absorvida em dados meios (sólidos ou gasosos) que sejam óticamente transparentes.

As lentes do espectrómetro foram reconhecidas e encontradas no Museu Faraday no dia 23 de junho de 2023, já depois de feita a gravação do Podcast. O espectrómetro, as lentes e o arco voltaico vieram de sítios diferentes do IST, mas agora este conjunto está completo. Esta é uma função fundamental do Museu Faraday, colecionar, estudar e pôr a funcionar os objetos que fazem parte da história pedagógica e científica do IST.



Fig. 12: A preciosa caixa de lentes do espectrómetro Adam Hilger de 1904, encontrada e identificada a 23 de junho de 2023, já depois de ter sido gravado o Podcast sobre o espectrómetro Adam Hilger (Museu Faraday).

Pode visitar a sala Newton do Museu Faraday do IST onde encontrará este notável espectrómetro associado à lâmpada de [Arco Voltaico](#).

Poderá, também, observar os moderníssimos espectrómetros desenvolvidos no IST cerca de 120 anos depois e que estão a ser comercializados no mercado mundial, com muito sucesso, por uma empresa portuguesa, de Vila Nova de Gaia, a Sarspec, Lda.

Os novos especrómetros desenvolvidos no IST

Entretanto, por volta de 2011, uma equipa do IST trabalhou na realização de um especrómetro de análise de chamas de elevado desempenho, num projeto financiado pela ANI, em co-promoção entre a empresa Scansci e o IST. O projeto, designado por INScan, foi aprovado em 1 de janeiro de 2012 e terminaria a 31 de dezembro de 2014. O projeto foi liderado pelo [Prof. Edgar Fernandes \(IST/DEM/In+\)](#). Nesta equipa participou o [Prof. João Mendanha Dias, \(IST/DF/GoLP/IPFN\)](#), como responsável pela ótica, o [Prof. João Sanches \(IST/DEB\)](#), responsável pela área de controlo e o Prof. Moisés Piedade (IST/INESC-ID) que foi responsável pela área de eletrónica. Este especrómetro destinava-se à análise de chamas resultantes da combustão de vários materiais, área de investigação do Prof. Edgar Fernandes.

Com a aposentação do Prof. Moisés Piedade, em julho de 2012, o Prof. Gonçalo Tavares (IST/INESC-ID) substituiu-o e continuou o desenvolvimento dos circuitos eletrónicos do especrómetro de elevado desempenho. No fim do projeto INScan foi realizado um protótipo que cumpriu quase todos os requisitos originais, mas alguns componentes críticos, nomeadamente os sensores, foram descontinuados. Em 4 de fevereiro de 2014, a Scansci focou-se mais na comercialização de equipamentos científicos e surgiu dela a nova empresa Sarspec que se dedicou ao desenvolvimento de equipamentos científicos. A Sarspec reavaliou a sua estratégia de comercialização e focou o seu interesse na fabricação de especrómetros mais acessíveis que fossem competitivos no mercado mundial tirando partido da excelente tecnologia que tinha sido desenvolvida no INScan. Daqui resultou a arquitetura Flex que constitui atualmente a linha mais competitiva de especrómetros comercializada pela empresa Sarspec. A parte ótica foi realizada pela equipa do Prof. João Mendanha Dias e a parte eletrónica foi realizada no INESC-ID por uma equipa liderada pelo Prof. Gonçalo Tavares.

Mais tarde, num novo projeto da ANI, proposto pela Sarspec, designado por RAMSERS⁸, do IST participaram as equipas do Prof. Gonçalo Tavares e o Prof. João Mendanha Dias. Neste projeto foram desenvolvidos novos especrómetros, mais avançados, baseados no efeito Raman que foi estudado por [C. V. Raman](#) (1888-1970). Este tipo de espetrometria produz resultados muito mais precisos e rigorosos do que a espetrometria ótica convencional, mas põe problemas de grande dificuldade na deteção de sinal. Estes problemas foram resolvidos, com melhoramentos quer na parte ótica quer na parte eletrónica. Foram desenvolvidos protótipos funcionais de dois especrómetros, que trabalham em dois comprimentos de onda distintos. Na parte ótica trabalharam o Prof. João Mendanha Dias e os bolseiros Rui Silva e Susana Silva. A parte eletrónica, que é de muito elevada complexidade, foi realizada no INESC-ID pelo Prof. Gonçalo Tavares e pelo bolseiro Fabian Näf.

A Sarspec prepara-se para industrializar e comercializar este tipo de especrómetros que competem num mercado mais restrito de espetrometria ótica mais avançada.

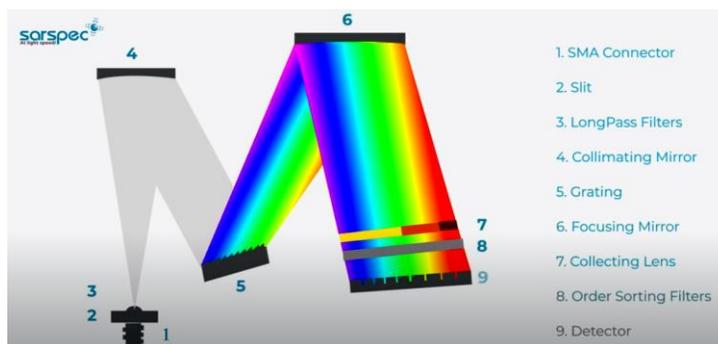


Fig. 13: Caminho ótico da luz no especrómetro Flex (publicidade Sarspec num vídeo).

⁸ - RamSERS - Development of portable Raman Spectrometers for detection of cancer biomarkers, ANI, LISBOA-01-0247-FEDER-017834, projeto iniciado em 2016/04/01e terminado em 2020/06/30.

Os especrómetros que foram desenvolvidos têm uma configuração de [Czerny-Turner](#), representada genericamente na Fig. 13, que permite uma elevada sensibilidade. Os principais componentes deste tipo de especrómetro são uma fenda de entrada (*slit*) que controla o nível ou intensidade de luz que entra no especrómetro bem como a sua resolução, um filtro *long-pass*, um espelho colimador seguido de [uma rede de difração](#). A luz difratada é refletida por um espelho de focagem que a faz incidir sobre um detetor de estado sólido CCD ou CMOS, normalmente de silício ou, no caso de comprimentos de onda maiores, de arsenieto de gálio, Fig. 13.

Além disso o projeto do especrómetro foi idealizado de modo a permitir a alteração simples de alguns dos seus componentes (por exemplo a fenda de entrada de luz, a rede de difração e o filtro ótico), o que permite adaptar o mesmo especrómetro base para diferentes gamas de comprimento de onda $\Delta\lambda$ e de resolução $\Delta\delta$. Com o projeto base tinha-se em vista desenvolver uma gama de especrómetros com características diferentes.

O especrómetro foi também desenvolvido de modo a ser extremamente compacto, com uma distância focal reduzida e com controlo das aberrações do circuito ótico numa banda alargada (UV-Vis-NIR⁹) por forma a resolução estar simplesmente limitada pelo sensor.

Os circuitos eletrónicos do especrómetro foram desenvolvidos tendo em vista a realização de um aparelho compacto sem comprometer a sua precisão, Fig.14.

A calibração do sensor é feita num modo completamente automático, nomeadamente: o estabelecimento do nível de base (*baseline*) devido ao ruído eletrónico do sensor no escuro (*dark noise*) e a determinação da amplificação do sinal que maximiza a gama dinâmica do sensor.

Isto foi conseguido através da interação entre circuitos analógicos de baixo ruído e um Processador Digital de Sinal (DSP), de alto desempenho, que implementa os algoritmos de calibração. Esta característica é única nesta gama de sensores e contribui para a sua grande competitividade comercial. Os circuitos de lógica digital de controlo são realizados por meio de um dispositivo CPLD e todo o controlo de fluxo de dados entre o especrómetro e um computador pessoal (PC) é realizado pelo DSP. O especrómetro tem uma resolução de amplitude do sinal de 16 bit.

Na Tab. 1 listam-se as principais características do especrómetro desenvolvido, cuja reconfiguração e facilidade de reprogramação permite a utilização de vários sensores disponíveis no mercado como, por exemplo, utilizando um detetor de silício CCD de 2048 pixel, ou outro com 3648 pixel, com uma gama dinâmica e resolução mais elevada.

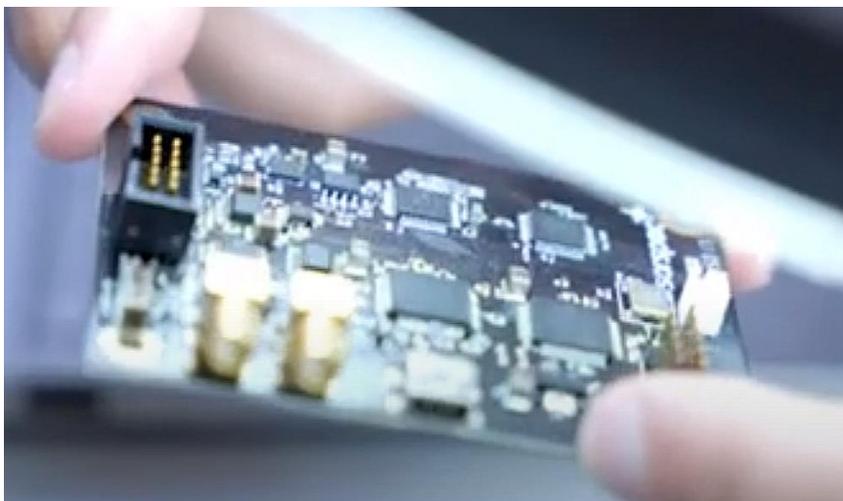


Fig. 14: Placa eletrónica básica do Flex (Publicidade Sarspec).

⁹ - UV-Vis-NIR Ultravioleta visível e infravermelho próximo do visível.

Tab. 1: Principais características do espectrómetro base desenvolvido Flex (versão básica).

Característica	Símbolo	Valor e Unidade
Sensores	CCD Silício ¹⁰	2048 pixel (3648 pixel)
Espetros/segundo		475 (@ T_{int} mínimo)
Resolução máxima	$\Delta\delta$	1,7 nm (0,75 nm) FWHM
Gama de espetros	$\Delta\lambda$	185 nm a 1100 nm
Tempo de integração	T_{int}	2 ms (3 ms) a 214 s
Resolução digital de amplitude	Bits A/D	16 bit
Função de <i>trigger</i> de espetro		Sim, IN/OUT com atraso
Gama dinâmica		32 dB
Relação sinal-ruído máxima	SNR	275

Na Fig. 15 mostra-se uma fotografia do espectrómetro desenvolvido no projeto INScan (versão flex). Como se pode constatar é um instrumento muito compacto, o que facilita a sua utilização em ambiente de ensino, de investigação ou industrial.

A entrada de luz na fenda é realizada através de uma ficha SMA 905 *standard* para fibra ótica visível existente no painel frontal. No painel anterior encontra-se a ficha USB de ligação a um computador pessoal e também duas fichas SMA para os sinais elétricos de sincronismo *trigger* IN e OUT (com atraso).

A flexibilidade dos circuitos eletrónicos e da ótica desenvolvida no IST, permitem à empresa comercializar cinco tipos de espectrômetros com resoluções diversas mas que são muito competitivos: Flex, Flex+, Sense, X-Res e ProNIR que cobrem um vasto leque de aplicações.

**Fig. 15: Espectrómetro Sarspec Flex.**

O espectrómetro básico Sarspec Flex tem características únicas que são realçadas pela empresa na documentação de divulgação dos seus espectrômetros, em inglês, Fig. 16, nomeadamente:

- *Perfect for General Purpose Applications;*
- *Improved Optical Design- The Best in Class*
- *User -Interchangeable Slits and Filters;*
- *UV-vis NIR (185 nm -1100 nm) Detection Range*
- *Fiber Optic Spectrometer;*
- *Software LightScan Included.*

¹⁰ - Os sensores básicos usados foram: Sony IX511B e Toshiba TCD1304AP. Na tabela, os números dentro dos parêntesis referem-se ao desempenho do espectrómetro com o sensor Toshiba.



FLEX

A POWERFUL AND FLEXIBLE SPECTROMETER THAT FITS IN THE PALM OF YOUR HAND

- *Perfect for General Purpose Applications*
- *Improved Optical Design – The Best in Class!*
- *User-Interchangeable Slits and Filters*
- *UV-Vis-NIR (185-1100 nm) Detection Range*
- *Fiber Optic Spectrometer*
- *Software LightScan Included*



PERFECT AS A GENERAL-PURPOSE SOLUTION

With a compact and flexible design, FLEX is more than capable of delivering a great performance with improved sensitivity and with the ability to be integrated in most general-purpose spectroscopic setups.



EASY TO INTEGRATE IN YOUR SETUP

The SMA fiber optic connector allows for a simple attachment of FLEX to a wide range of spectroscopic setups without the need for complex optical alignments. This flexibility is complemented with a trigger integration tool, which includes triggers in/out and delays. FLEX and all spectroscopic components of your setup can be centralized for full control with our new SPEC Hub solution.

Fig. 16: Cópia de parte da documentação comercial da Sarspec sobre o espectrômetro Flex.

I- Caracterização do espectro de luz emitido por uma lâmpada de cripção

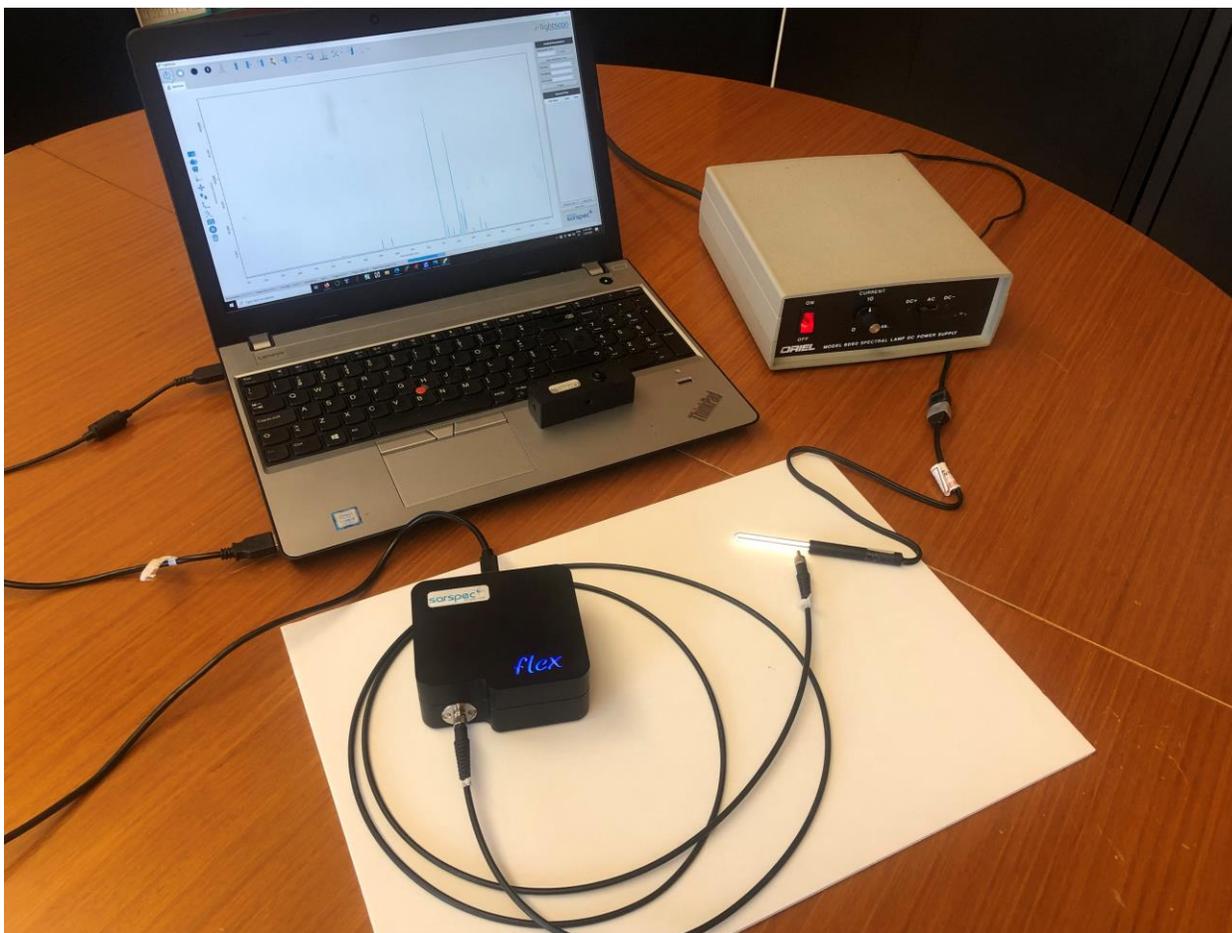


Fig. 17: Fotografia do ensaio de uma lâmpada de cripção com o espectrômetro flex. À direita encontra-se a lâmpada com a respetiva fonte de alimentação. Neste caso, a luz entra diretamente na extremidade da fibra ótica.

Na Fig. 17 mostra-se um exemplo prático de utilização do espectrômetro flex na caracterização do espectro de uma lâmpada de cripção obtida com o espectrômetro flex. Este tipo de configuração analítica é importante em espectroscopia molecular, na análise da absorvância ou transmitância, que permite a determinação da concentração molar de substâncias em amostras líquidas a partir do conhecimento do espectro ([lei de "Beer-Lambert"](#)). Nesta aplicação é normalmente utilizada uma lâmpada de deutério ou tungstênio/halogéneo. Outras aplicações importantes incluem a análise da refletância (medida da opacidade de substâncias em determinados comprimentos de onda) e ainda a análise da fluorescência de substâncias com base no espectro da radiação espontânea emanada após a incidência de luz visível ou ultravioleta.

II- Caracterização do espectro solar e de uma lâmpada de LED

Na Fig. 18 apresenta-se uma imagem obtida pela captura de ecrã de um PC com os resultados visualizados pela da aplicação *Lightscan* (desenvolvida pela Sarspec com base no *software* de demonstração desenvolvido ao longo do projeto pelo IST/INESC-ID). A aplicação interage com o espectrómetro via uma interface USB 2.0 e permite a configuração de todos os parâmetros de aquisição bem como a recolha e a visualização dos espectros (ou guardá-los para análise posterior). Neste caso mostra-se o espectro da luz de uma lâmpada de iluminação LED e também o espectro da luz solar. Neste último caso são visíveis as linhas de absorção do cálcio (H-K) respetivamente nos comprimentos de onda 396,9 nm e 393,3 nm, estudadas por Edwin Hubble no caso de diversas galáxias para estabelecer a chamada “lei de Hubble”, já anteriormente referida.

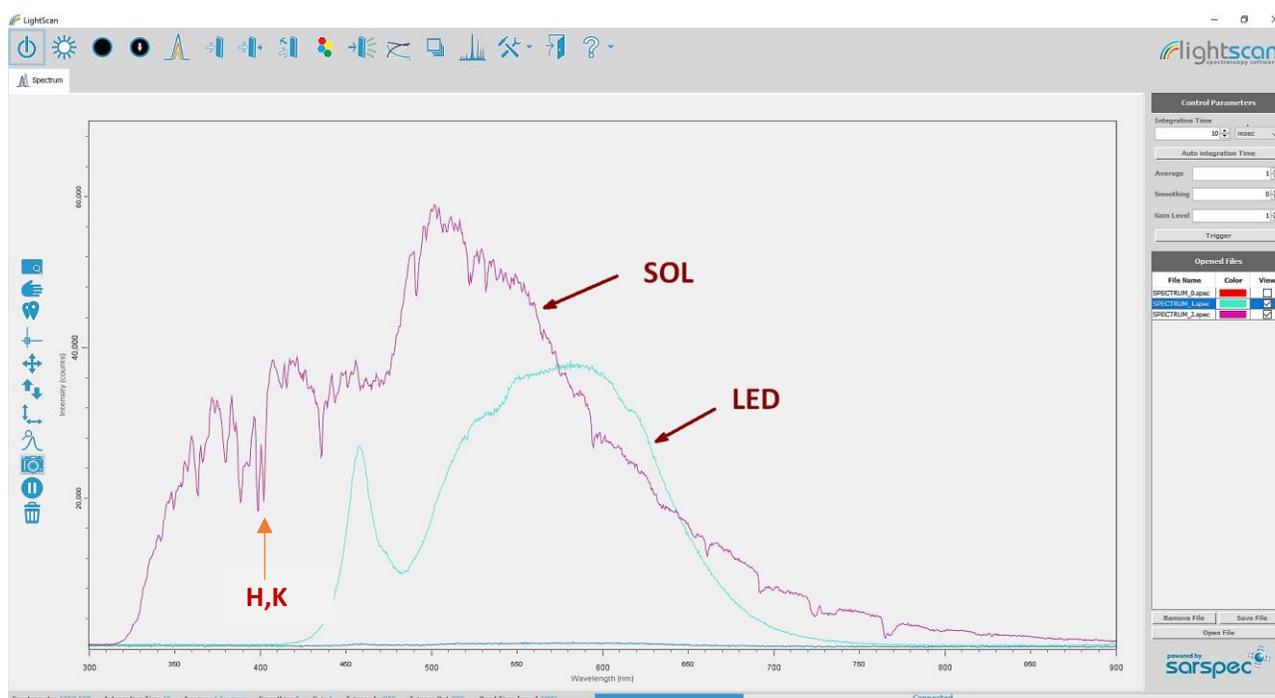


Fig. 18: Espectros: da luz solar na atmosfera e de uma lâmpada de iluminação LED. Indicam-se as linhas de absorção H e K do cálcio.

Referências:

- [1] - J. Brisson Lopes, “ Cor e Luz”, IST.
- [2] - Charles M. Wilson, Spectrographic Analysis as an Aid in Identification Problems, 25 Am. Inst. Crim. L. & Criminology 160 (1934-1935).
- [3] - Pilkington, Ben. 2020. [How is Spectroscopy Used in Forensics. AzoOptics.](#)
- [4] - R. M. A. Azzam* and Ryan M. Adams, [Vol. 27, No. 9/September 2010/ J. Opt. Soc. Am. A](#) 27, 2085-2090 (2010).

Sítios na Internet:

<https://www.azooptics.com/Article.aspx?ArticleID=1876>.

<https://www.youtube.com/watch?v=2ew5OB7LmyE>

<https://www.youtube.com/watch?v=wf9avbzUjbQ>

<https://physics.stackexchange.com/questions/82418/analytic-solution-for-angle-of-minimum-deviation/410797#410797>

Publicidade da empresa Sarspec, Lda.

[Canal Sarspec no Youtube](#)

[Vídeo Institucional 1](#)

[From Portugal to the World](#)

[proNIR Spectrometer](#) (850 nm to 2500 nm with thermoelectric cooling)

[Sense Spectrometer](#) (higher resolution and thermoelectric cooling)

[Flex- Powerful and Flexible Spectrometer](#)

[Flex no Ártico](#)