

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE SÃO PAULO
PUC/SP

MARCELO PIROLO

A CONTRIBUIÇÃO DE ROBERT WILHELM BUNSEN E GUSTAV
ROBERT KIRCHHOFF PARA A ESPECTROSCOPIA DO SÉCULO
XIX

MESTRADO EM HISTÓRIA DA CIÊNCIA

Dissertação apresentada à Banca
Examinadora da Pontifícia Universidade
Católica de São Paulo, como exigência
parcial para obtenção do título de mestre
em História da Ciência, sob a orientação
da Prof^a Dr^a Márcia Helena Mendes Ferraz

SÃO PAULO
2010

Banca Examinadora

Às mulheres da minha vida:
Maria do Carmo, Ester e Beatriz

AGRADECIMENTOS

À professora Márcia, pela paciência com que conduziu nossas orientações, pelas indicações de materiais para a realização da pesquisa, pelos conhecimentos transmitidos e por ter acreditado na realização deste trabalho.

À Ester, que me auxiliou nas revisões de todos os trabalhos e que compreendeu minhas ausências em alguns momentos.

À minha família, que em todos os momentos me apoiou e contribuiu com muita paciência nas horas difíceis.

A todos os professores do curso, por terem auxiliado significativamente no meu crescimento intelectual e por terem mostrado um pouco desse campo fascinante que é a História da Ciência.

A todos os colegas de curso, que se demonstraram sempre pessoas íntegras, sinceras, companheiras e que estiveram constantemente participando ativamente do processo de construção de nossos conhecimentos.

À Secretaria de Educação do Estado de São Paulo, pela bolsa de estudos concedida, pois sem ela seria impossível a realização desta pesquisa.

Piroló, Marcelo. **A contribuição de Robert Wilhelm Bunsen e Gustav Robert Kirchhoff para a espectroscopia do século XIX**. Dissertação de mestrado. Programa em estudos pós graduados em História da Ciência da Pontifícia Universidade Católica de São Paulo.

RESUMO

Esta dissertação aborda o trabalho de dois pesquisadores alemães, Robert Wilhelm Bunsen e Gustav Robert Kirchhoff que, no século XIX, fizeram uma síntese dos procedimentos em utilizados em espectroscopia até o momento, modificando alguns métodos e auxiliando numa melhor compreensão e análise da luz emitida por materiais incandescentes.

Após alguns experimentos desenvolvidos com Henry Roscoe sobre fotoquímica, Bunsen dedicou-se, juntamente com Kirchhoff, às análises espectrais.

A espectroscopia é um método em que a luz de uma determinada fonte é decomposta em cores através de um prisma, formando um espectro, no qual são formadas linhas que, de acordo com suas posições, indicam a presença de elementos químicos. Esse método pode ser usado para saber a composição química de materiais terrestres e celestes.

O método auxiliou na descoberta primeiramente do césio e do rubídio por Bunsen e Kirchhoff e, posteriormente, de mais elementos químicos por outros pesquisadores. O hélio, por exemplo, foi descoberto no espectro solar antes de ser conhecido na Terra.

A análise espectral, ao analisar corpos distantes a milhões de quilômetros, tornou possível algo que poucos acreditavam, demonstrando assim que seria possível determinar a composição química de corpos terrestres e celestes.

Para a realização deste trabalho analisamos principalmente as obras "Photochemical Researches", escrita por Bunsen e Roscoe e publicada pela *Proceedings of the Royal Society of London* e *Spectrum Analysis*, escrita por Roscoe, buscando reconhecer como se formaram e se desenvolveram as idéias de análise espectral no século XIX.

Palavras-chave: História da Ciência, História da Química, História da Física, espectroscopia, Bunsen, Kirchhoff.

ABSTRACT

The dissertation approaches the works of the German researchers Robert Wilhelm Bunsen and Gustav Robert Kirchhoff which have synthesized the spectral proceedings that had been used until the end of the nineteenth century. They had modified the methodology to increase a better understanding of the procedure as of the analysis of the emanated light of incandescent materials.

After developing a number of experiments with Henry Roscoe on photochemistry, Bunsen had dedicated himself together with Kirchhoff to spectrum analysis.

Spectroscopy is the analysis of light spectra and the way in which light interacts with matter. The light source is normally directed on a slit and is separated by the use of a prism. The image of the slit has the shape of a line to its component colors, which indicates the presence of chemical elements. Spectrometry is the technique used to assess the chemical composition and concentration of materials.

This method had historically helped Bunsen and Kirchhoff finding out elements like caesium and rubidium and continued helping others to find out new elements too. For instance, helium was discovered before in solar spectrum than in earth.

The spectrum analysis, enables the study in enormous distances, and consequently had transformed the Idea concerning the study of celestial bodies and finally it had provided a method for determining their chemical composition.

In this dissertation we had focused on two specific works: the "Photochemical Researches" written by Bunsen and Roscoe and published in the *Proceedings of the Royal Society of London*. And *Spectrum Analysis* written solely by Roscoe, trying to identify the development of what would be the spectral analysis of the nineteenth century.

Keywords: History of Science, History of Chemistry. History of Physics, Spectroscopy, Bunsen, Kirchhoff.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	1
1. AS PESQUISAS FOTOQUÍMICAS E A TRANSIÇÃO PARA A ESPECTROSCOPIA.....	5
1.1 BUNSEN E KIRCHHOFF: OS PESQUISADORES EM QUESTÃO.....	6
1.2 A TRANSIÇÃO DA FOTOQUÍMICA PARA A ESPECTROSCOPIA.....	11
1.3 A ESPECTROSCOPIA.....	16
1.4 O ESPECTROSCÓPIO.....	23
1.5 A DESCOBERTA DE DOIS NOVOS ELEMENTOS QUÍMICOS: O CÉSIO E O RUBÍDIO.....	34
1.6 A REVERSÃO DAS LINHAS.....	38
2. OS DESDOBRAMENTOS DA ESPECTROSCOPIA E SUA IMPORTÂNCIA PARA A ASTROFÍSICA.....	41
2.1 DESENVOLVIMENTO DA ESPECTROSCOPIA A PARTIR DOS ESTUDOS DE BUNSEN E KIRCHHOFF.....	41
2.2 A ANÁLISE DO ESPECTRO SOLAR.....	55
2.3 INFLUÊNCIA DA ESPECTROSCOPIA PARA A ASTROFÍSICA.....	62
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	81
BIBLIOGRAFIA.....	85

INTRODUÇÃO

A motivação para realizar esta pesquisa surgiu da paixão pela ciência, por suas questões históricas e, muito mais forte, pelas astronômicas. A idéia inicial era unir conhecimentos sobre química, física, astronomia e analisar de uma maneira muito cuidadosa a ciência que acontecia no século XIX.

Algumas questões me deixavam intrigado: Como seria possível determinar a composição química e física dos corpos fora da Terra, como os planetas, o Sol e as estrelas? Em que época esses estudos se desenvolveram significativamente? Qual a importância desses conhecimentos para a época? Esta seria uma maneira de ligar esses ramos do estudo científico, através de algo extremamente interessante. Esse assunto se chamava espectroscopia, um método que identificava a composição química e física de corpos terrestres ou celestes pela decomposição da luz.

Dois pesquisadores alemães, o químico Robert Wilhelm Bunsen e o físico Gustav Robert Kirchhoff, fizeram, em 1859, uma síntese dos procedimentos realizados até aquele momento utilizando o método da espectroscopia e proporcionaram alterações que ajudavam na análise e identificação de materiais na Terra ou em corpos distantes, como o Sol ou as estrelas fixas.

Antes de realizar os trabalhos com Kirchhoff, Bunsen se dedicou, durante alguns anos, ao lado do inglês Henry Roscoe, às pesquisas fotoquímicas, ou seja, às análises da influência da luz no comportamento das reações químicas.

Henry Enfield Roscoe nasceu em 1833 em Londres, onde estudou, a partir dos 15 anos de idade, no *University College London*. Mais tarde, em Heidelberg iniciou seus trabalhos sobre a ação química da luz com Bunsen.

Após alguns anos de pesquisa, Bunsen e Roscoe escreveram, entre 1856 e 1863, a obra “Photochemical Researches”¹, publicada pela *Proceedings of the Royal Society of London*. Dividida em cinco partes, cada uma delas foi publicada separada e simultaneamente em dois idiomas: o inglês e o alemão.

A obra trata de assuntos como a medida da ação química da luz, o fenômeno da indução fotoquímica, a óptica dos raios químicos, as pesquisas fotoquímicas e a medida direta da ação química da luz do Sol. Esses estudos investigavam a influência da luz nas reações e o poder que elas exerciam no arranjo das substâncias.

Nos últimos estudos sobre fotoquímica, Bunsen e Roscoe perceberam que algumas porções da luz poderiam ser quimicamente ativas. Sendo assim, era necessário que a luz fosse decomposta para ser estudada.

Bunsen iniciou seus trabalhos com Kirchhoff realizando experimentos ligados à espectroscopia e deixou os estudos sobre fotoquímica em segundo plano. Algumas obras escritas por eles são: *Researches on the Solar Spectrum and the Spectra of the Chemical Elements*², por Kirchhoff, e *Chemical analysis of substances by observations on their spectra*³, por Bunsen e Kirchhoff. Ainda que tais obras sejam comentadas nesta dissertação, um texto composto por Roscoe será principalmente abordado para analisar a espectroscopia no século XIX: *Spectrum Analysis*⁴, publicado em 1873.

A obra *Spectrum Analysis* é a coletânea das seis conferências que Henry Roscoe deu em 1868, acrescida de apêndices com textos de autores abordados nas suas apresentações. O livro não relata apenas a espectroscopia no século

¹ Bunsen & Roscoe, “Photochemical Researches”.

² Kirchhoff, *Researches on the Solar Spectrum and the Spectra of the Chemical Elements*.

³ Kirchhoff & Bunsen, “Chemical analysis of substances by observations on their spectra”.

⁴ Roscoe, *Spectrum Analysis*.

XIX, mas uma visão de Roscoe sobre ela, pois, pelo fato de estar envolvido com o trabalho que estava apresentando, seus relatos eram um tanto parciais, com uma tendência em mostrar as contribuições dos pesquisadores ingleses para o assunto.

Spectrum Analysis faz um relato das descobertas de Newton sobre a composição da luz; dos estudos de Wollaston e Fraunhofer com os prismas; da construção e uso do espectroscópio; das descobertas de novos elementos químicos; das análises das linhas espectrais feitas por Bunsen, Kirchhoff e outros pesquisadores; das pesquisas realizadas com o espectro solar; e da análise de outros corpos e fenômenos celestes como os planetas, as estrelas, os cometas, as nebulosas, as auroras e os eclipses.

O objetivo deste estudo é verificar os métodos de pesquisa em espectroscopia usados na época, analisar as contribuições da análise espectral para a ciência e comparar as obras principais com outras fontes.

Esta pesquisa será dividida em dois capítulos, em que será descrita e analisada a espectroscopia no século XIX.

No primeiro capítulo analisaremos a importância da fotoquímica e a transição para a espectroscopia, ou seja, como esses estudos da ação química da luz auxiliaram a análise espectral; também faremos uma breve explanação sobre os pesquisadores Bunsen e Kirchhoff; faremos uma apresentação do espectroscópio e de sua aplicação na descoberta de novos elementos químicos; e ainda mostraremos as linhas que indicam a presença de elementos.

No segundo capítulo iremos mostrar alguns desdobramentos ocorrentes a partir do estudo sobre espectroscopia desenvolvido por Bunsen e Kirchhoff; analisaremos a importância da análise espectral para compreender a estrutura

química e física do Sol, dos planetas e das estrelas fixas; e ainda os estudos e análises de outros fenômenos celestes, como os cometas, as nebulosas, os eclipses, as auroras, entre outros.

Em termos gerais, esta pesquisa pretende ser um trabalho inicial no estudo da história da espectroscopia, primeiramente vista através do prisma de um importante estudioso, Roscoe, que se propôs a apresentar uma série de palestras abordando o assunto, dialogando com a história de uma área de conhecimento que se mostrava muito promissora, da qual ele era protagonista. Trabalhos futuros deverão aprofundar várias das questões aqui apresentadas.

1. AS PESQUISAS FOTOQUÍMICAS E A TRANSIÇÃO PARA A ESPECTROSCOPIA

Quando analisamos a história da química, da física, da astronomia, ou das ciências de modo geral, entendemos que não existiram momentos de maior ou menor importância, que os “grandes inventores” utilizaram inúmeros pensamentos para chegar a uma determinada teoria e as “grandes descobertas” sempre foram construídas através de discussões, conflitos, debates, falhas e que, até hoje, a ciência se mostra como algo em construção e inacabado.

Não podemos escolher determinado momento em que cada um dos segmentos científicos teve início, pois a curiosidade que move o ser humano existe desde que foram observados e analisados os fenômenos que ocorrem na natureza. O fascínio pelo céu, a intenção de transformar materiais, a busca pelas fontes de energia, a vontade de descobrir de onde viemos, para onde vamos e a curiosidade de conhecer a composição das substâncias, sempre fez com que o homem, através de observações, experimentações, análises, tentasse fornecer meios em que os fenômenos pudessem ser explicados.

O século XIX também traz contribuições importantes para o desenvolvimento da investigação da composição química da matéria. Na tentativa de se descobrir a composição das substâncias da natureza, um método, que já era conhecido há algum tempo, mas que não era utilizado para tal análise, passou a ser desenvolvido: a espectroscopia. Através da espectroscopia, dois pesquisadores alemães Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) e Robert Wilhelm Eberhard Bunsen (1811-1899)⁵, fizeram, de alguma forma, uma síntese dos

⁵ Roscoe. “Bunsen Memorial Lecture”,514.

procedimentos até então realizados com o espectrômetro ou espectroscópio, introduzindo modificações significativas que os levaram a conclusões importantes para os conhecimentos de corpos terrestres e também celestes.

1.1 BUNSEN E KIRCHHOFF: OS PESQUISADORES EM QUESTÃO

Muitos nomes tiveram destaque no campo da análise espectral, muitos estudos foram realizados, tentando compreender, modificar e aperfeiçoar os trabalhos dessa área de conhecimento, e mesmo após seu desenvolvimento, inúmeros pesquisadores utilizaram esse método para identificar substâncias novas e estudar os corpos celestiais. Mas os trabalhos de Bunsen e Kirchhoff merecem uma atenção especial.

Robert Wilhelm Bunsen nasceu em 31 de março de 1811. Após um curso ginásial, entrou na universidade em 1828, estudou química e obteve sua graduação em 1830. Em 1833, foi admitido na Universidade de Göttinger, onde iniciou seus trabalhos como professor de química.⁶ Em 1844, construiu seu famoso fotômetro e em 1855 começaram as investigações fotoquímicas feitas por ele e Henry Enfield Roscoe (1833-1915), as quais foram consideradas por Friedrich Wilhelm Ostwald (1853-1932) como “o exemplo clássico de todas as pesquisas futuras em físico-química.”⁷ Em Heidelberg, Bunsen e Roscoe realizaram suas pesquisas em fotoquímica e, posteriormente, em 1859, Bunsen deixou os trabalhos com Roscoe para realizar pesquisas com a análise espectral.⁸

⁶ Roscoe, “Bunsen Memorial Lecture”, 514.

⁷ Ibid., 528.

⁸ Ibid., 531.

Gustav Robert Kirchhoff nasceu em 12 de março de 1824. Depois de terminar o ginásio, continuou seus estudos em física e matemática e se formou em 1847. Foi professor extraordinário e co-diretor do Instituto de Física em Breslau entre 1850 e 1854, onde trabalhou durante muito tempo com Bunsen. Em 1852, Bunsen foi para a Universidade de Heidelberg e Kirchhoff o seguiu dois anos depois, ficando nesta universidade até 1875, quando foi apontado professor de matemática e física na Universidade de Berlin⁹. Kirchhoff também foi autor de duas leis fundamentais da teoria clássica dos circuitos elétricos e da emissão térmica.

Robert von Helmholtz, colaborador da revista *Popular Science Monthly*, deu uma interessante descrição sobre Kirchhoff, mostrando uma imensa admiração por ele:

Foi uma surpresa em Heidelberg, quando um tímido jovem apareceu recomendado por Bunsen. [...] Sua fala refinada e animada, seu comportamento cortês e atrativo, seu fino senso de humor e sua inteligência, fizeram-no ter um ótimo relacionamento com todos que teve contato. Ele foi bem-vindo dentro de todo aquele círculo social. [...] Os dois eram aparentemente muito diferentes um do outro; no entanto, não apenas realizaram trabalhos em conjunto, como também tiveram uma vida diária juntos.¹⁰

Entre 1856 e 1863, Bunsen realizou alguns trabalhos sobre fotoquímica com Roscoe e escreveram a obra "Photochemical Researches", publicada pela *Proceedings of the Royal Society of London*. Dividido em cinco partes, o estudo relata alguns trabalhos desenvolvidos, como por exemplo: a medida e a influência

⁹ Obituário de Kirchhoff, anônimo, *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, 370.

¹⁰ Robert Von Helmholtz, *Popular Science Monthly*, citado em Obituário de Kirchhoff, anônimo, *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, 370.

da ação química da luz sobre algumas substâncias, o fenômeno da indução química,¹¹ e ainda sobre as interações que podem ocorrer quando substâncias estão sujeitas à insolação constante e à dependência da duração da indução sobre um constante volume de gás. Esses experimentos demonstraram:

1. Que o tempo necessário para efetuar o início da indução fotoquímica diminui com o aumento da luz, e numa razão maior do que o aumento de luz;
2. Que o tempo que decorre para a ação química atingir seu máximo também diminui com o aumento da luz, mas numa razão muito menor;
3. Que o crescimento da indução avança primeiramente numa série expansiva, até atingir o máximo, e então converge quando a verdadeira ação máxima é atingida. A lei que regula o aumento da indução pelo aumento da luz torna-se visível através de curvas.¹²

A mesma obra também analisa a ação direta e difusa da luz solar interagindo com algumas substâncias e a influência das condições atmosféricas e climáticas na ação fotoquímica da luz do Sol. Bunsen e Roscoe trabalharam no desenvolvimento de um papel fotossensível, para que essa ação da luz pudesse ser medida.¹³ Esse método de medida somente seria válido¹⁴:

1. Se o fenômeno da indução fotoquímica não interferisse no escurecimento do papel;
2. Se a superfície fotográfica de um grau constante de sensibilidade pudesse ser preparada;

¹¹ Indução química ocorre quando a resistência a novas combinações é desprezível, promovendo a formação de um novo composto químico. Ponto de partida para a compreensão do conceito de afinidade entre os materiais.

¹² Bunsen & Roscoe, "Photochemical Researches," abstract, parte II, 327.

¹³ Ibid., abstract, parte V, 308.

¹⁴ Ibid., 309.

3. Se uma tonalidade imutável pudesse ser obtida, a qual pudesse ser exatamente comparada com o papel fotográfico.¹⁵

A fonte de energia solar sempre foi um assunto muito analisado. Nos trabalhos sobre fotoquímica, desenvolvidos por Bunsen e Roscoe, o Sol era considerado responsável pela interação entre as substâncias, proporcionando novas combinações e a formação de outros materiais. O papel fotossensível é composto por sais de prata. E do mesmo modo que a pele humana escurece gradativamente quando sofre ação da luz solar, a prata também tem um escurecimento por ser sensível à luz.

O interesse de Bunsen e Roscoe ainda não estava voltado para a espectroscopia, sendo que o estudo realizado por eles era de observação das reações químicas causadas pela ação da luz. A intenção era verificar como a luz poderia interagir com as substâncias e proporcionar alterações, mostrando inclusive a questão do rearranjo da matéria. Os trabalhos fotoquímicos estavam diretamente ligados a dois elementos: o hidrogênio e o cloro. A idéia era mostrar como a luz solar interfere no comportamento desses elementos.

Num artigo de Russel Colin publicado na *People in physics*, o autor cita algumas conclusões descritas por Ostwald na obra: “*The classical example for all further researches in physical chemistry*” referente aos trabalhos de Bunsen e Roscoe¹⁶:

1. As leis para os raios quimicamente ativos são as mesmas para os raios visíveis;
2. Nas reações (como entre o hidrogênio e o cloro) há um período de indução antes da explosão;

¹⁵ Bunsen & Roscoe, “Photochemical Researches,” abstract, parte V, 309.

¹⁶ Russel, “Bunsen without his burner”, 325.

3. A ação fotoquímica depende integralmente da quantidade de incidência de luz e dos comprimentos de onda.¹⁷

Os estudos realizados por Bunsen e Roscoe estavam ligados às alterações químicas que os materiais podiam sofrer quando recebiam uma determinada quantidade de raios solares. Esse estudo auxiliou também em pesquisas posteriores na determinação e identificação de raios que não estavam presentes na porção visível do espectro. A partir das observações e descrições de que a luz poderia apresentar porções diferentes e que uma parte dessa luz poderia causar efeito diferente de outra parte, os estudos passaram a ser direcionados para a decomposição da luz, não para analisar o espectro, mas para saber onde estavam exatamente esses raios quimicamente ativos.

Os raios quimicamente ativos eram justamente aqueles que não podiam ser identificados no espectro e podiam promover alterações nas substâncias. Eles estavam localizados além da região vermelha e violeta do espectro.¹⁸

¹⁷ Russel, "Bunsen without his burner", 325.

¹⁸ Hoje esses raios são chamados de ultravioleta e infravermelho.

1.2 A TRANSIÇÃO DA FOTOQUÍMICA PARA A ESPECTROSCOPIA

Os trabalhos desenvolvidos por Bunsen e Roscoe, descritos na obra “Photochemical Researches”, levaram Bunsen a aprimorar seus estudos relativos ao comportamento da luz e sua relação com algumas reações químicas. Esses estudos mostravam a influência da luz na formação de algumas substâncias. Os pesquisadores queriam mostrar que a luz poderia promover alterações numa mistura de gás cloro e gás hidrogênio, formando um composto químico.¹⁹

Observando o foco dos trabalhos realizados por Roscoe e Bunsen, podemos perceber um direcionamento da pesquisa para cinco aspectos:

1. O comparativo e as medidas absolutas dos raios químicos;
2. Ação química da difusão da luz do dia;
3. Ação química da luz direta do Sol;
4. Ação fotoquímica do Sol, comparando com as fontes de luz terrestres;
5. Ação química das partes constituintes da luz solar.²⁰

Nas pesquisas fotoquímicas, Bunsen e Roscoe perceberam que seria necessário estudar as partes constituintes da luz separadamente. Ao analisar a constituição da luz solar, ele percebeu que ela seria composta por partes e que cada uma dessas partes poderia causar efeitos diferentes na matéria. Essa questão contribuiu para que Bunsen iniciasse seus estudos sobre a decomposição da luz, base da espectroscopia.

A espectroscopia é um método experimental, no qual a luz emitida por uma fonte é decomposta através da passagem por um prisma. A luz branca é separada e forma um espectro colorido, sendo possível determinar, através do

¹⁹ Bunsen & Roscoe, “Photochemical Researches,” parte II, 381.

²⁰ Ibid., parte IV, 880.

tipo de espectro, a composição química dessa fonte de luz. O estudo dos espectros é a determinação de como a luz emitida por uma fonte está distribuída ao longo de vários comprimentos de onda. Um exemplo é o arco-íris, em que a luz do Sol é separada em várias cores do espectro visível.²¹

Bunsen ainda considerou a refração e a reflexão existentes na atmosfera, o que atrapalharia os estudos em fotoquímica e a comparação com fontes de luz terrestres, pois a ação fotoquímica dependia muito da quantidade de raios recebidos, causando uma modificação na matéria. Ele percebia que a ação química dos raios da luz do Sol dependia de alguns fatores, como as condições do céu, o momento em que as observações ocorriam e a comparação com fontes de luz produzidas na Terra.

Bunsen e Roscoe realizaram experimentos observando a diminuição da luminosidade após a passagem da luz por alguns materiais. Foram observados:

1. A diminuição que a luz sofre na passagem através da placa de mica;
2. A diminuição que a luz sofre na passagem através de uma camada de água;
3. A luz perdida por reflexão da superfície de vidro do recipiente de insolação.²²

Seria importante um estudo detalhado sobre as perdas de luz na indução química então realizada por Bunsen e Roscoe, pois para a fotoquímica a quantidade de raios que incidiam nos materiais era importante. Uma grande quantidade de raios poderia proporcionar resultados mais eficientes e alguns fatores poderiam alterar os resultados. A reflexão da luz precisaria ser analisada e reduzida para se obter um resultado mais significativo. Também seria

²¹ Friaça et al., *Astronomia: Uma visão geral*, 32.

²² Bunsen & Roscoe, "Photochemical Researches," parte IV, 882.

importante observar em que região da luz o efeito seria melhor, daí a importância do estudo dos espectros.

Ainda na obra “Photochemical Researches”, o estudo estava voltado à quantidade de luz recebida do céu, seja pela luz solar direta ou pela luz do dia. A análise tentava identificar uma possível influência da luz solar nas reações químicas.

No desenvolvimento do estudo da ação química dos raios solares nas substâncias, vários procedimentos foram adotados, dentre eles a comparação dos raios solares, a análise da ação da luz do Sol e da luz do dia, a comparação da fonte de luz solar com fontes de luz terrestre, mas um aspecto pode ter sido importante para deixar Bunsen mais interessado em estudar o espectro: a ação química das partes constituintes da luz solar.²³

A ação química efetuada por várias porções do espectro solar não depende somente da natureza da refração, mas também da espessura da coluna de ar, através da qual a luz passava antes da decomposição. Nos seguintes experimentos nós temos empregado prismas e lentes de quartzo, em vez de prismas de vidro.²⁴

Na descrição acima, já era possível observar uma possível transição para a espectroscopia, inclusive para a continuação da observação da ação química causada pelos raios solares. A intenção era analisar os raios de luz após a separação realizada pelas lentes, verificando a região do espectro em que os raios estavam mais ativos. O espectro, sendo direcionado para uma superfície branca, fornecia as linhas escuras identificadas pelo alemão Joseph von

²³ Bunsen & Roscoe, “Photochemical Researches,” parte IV, 923.

²⁴ Ibid.

Fraunhofer (1787-1826). Segundo ele, seria possível identificar e analisar a região no espectro além do violeta.

Bunsen e Roscoe realizaram experimentos verificando a ação química em todas as regiões do espectro e a conclusão é que: “a ação química diminui, muito mais regularmente e rapidamente, em direção ao vermelho que em direção ao fim do violeta do espectro”.²⁵

Os raios quimicamente ativos, de acordo com Bunsen e Roscoe, apresentavam poder de aquecimento e eram encontrados na região vermelha do espectro. Não era possível fazer uma separação da luminosidade e do poder de aquecimento dos raios. Existia, porém, uma região onde os raios de luz eram invisíveis e quimicamente ativos.²⁶

A maior parte da ação química, na região visível do espectro, era verificada entre a linha G na região do índigo e na linha H na região do violeta, e na região do final do vermelho. A ação química tornava-se imperceptível sobre a linha D, no laranja.²⁷ A figura 1 mostra a ação química efetuada em várias porções do espectro.

²⁵ Bunsen & Roscoe, “Photochemical Researches,” parte IV, 925.

²⁶ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 13.

²⁷ *Ibid.*, 20.

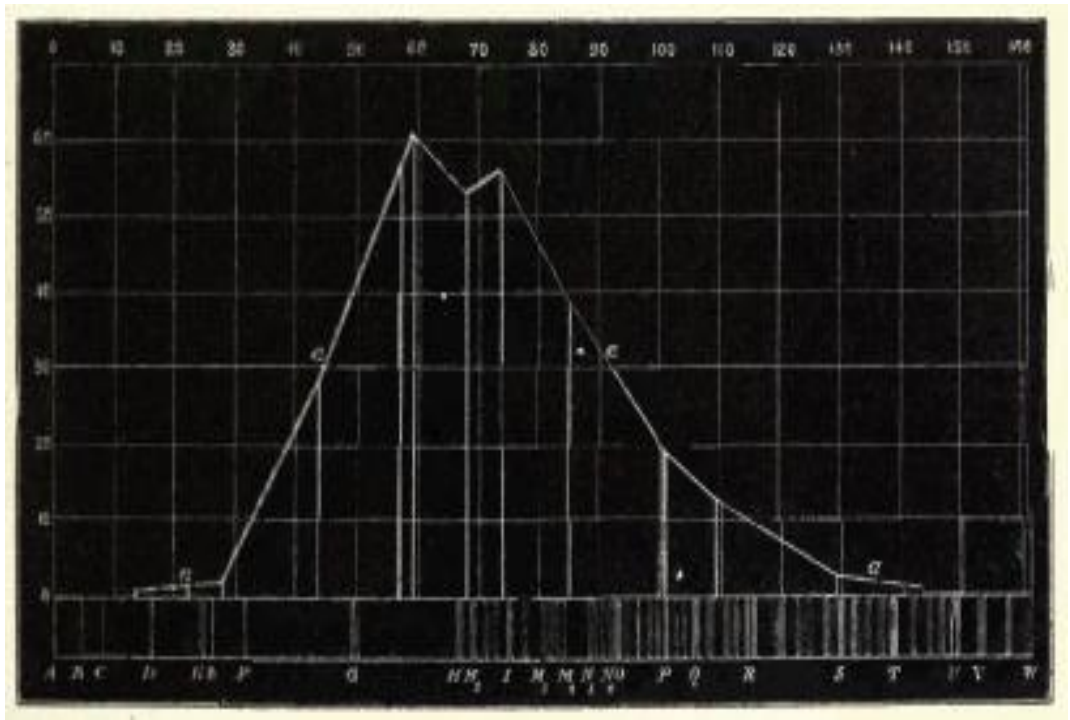


Figura 1²⁸

A ação dos raios quimicamente ativos exercia sobre a Terra importante influência na fauna e na flora e tornava-se um assunto importante para medir corretamente as variações de intensidade com as mudanças de temporadas, e nas diferentes partes do globo. Esse também foi um estudo interessante desenvolvido por Roscoe e Bunsen.²⁹

Experimentos foram realizados em diversas partes do mundo, observando os raios quimicamente ativos. Alguns foram realizados no Brasil, no estado do Pará, cortado pela linha do equador. As observações foram feitas hora a hora e grandes alterações da intensidade química foram observadas. A diferença de região no globo e o horário em que ocorreram as observações devem ser considerados, pois a incidência dos raios solares variava muito considerando esses fatores. Sendo assim, a atmosfera podia se apresentar de maneiras

²⁸ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 19.

²⁹ *Ibid.*, 23.

diferentes, mais espessa ou com uma camada maior de material particulado dissolvido.³⁰

1.3 A ESPECTROSCOPIA

No século XVII, Isaac Newton (1643-1727) começou a introduzir esse método que, mais adiante, auxiliaria muito na descoberta de novos elementos químicos.

Newton, quando se dedicava ao polimento de lentes ópticas não esféricas, percebeu que a luz, ao passar de um meio de propagação para outro, sofre um desvio, ocorrendo uma refração ou difração da luz. Em um de seus experimentos, Newton utilizou um feixe de luz passando por um prisma em um quarto escuro, e descobriu aquilo que seria chamado de espectro.

E havendo, para esse fim, escurecido meu quarto e feito um pequeno orifício na veneziana da minha janela, para admitir a entrada de uma quantidade conveniente de luz solar, coloquei meu prisma à entrada dele, para que a luz fosse refratada na parede oposta. A princípio foi uma diversão muito agradável observar as cores vívidas e intensas assim produzidas, mas, depois de algum tempo empenhando-me em vê-las numa forma oblonga, porquanto, segundo as leis aceitas da refração, eu esperava que ela fosse circular.³¹

Newton foi instigado com as descobertas, e sendo para ele a experimentação extremamente importante, ainda utilizou outros métodos

³⁰ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 25.

³¹ H. W. Turnbull, J.F. Scott, A. Rupert Hall, Laura Tilling (orgs.), *The Correspondence of Isaac Newton* (Cambridge: Cambridge University Press, 1959-1977), v.1, pp 92-102, citado em I. Bernard Cohen e Richard S. Westfall. *Newton: textos, antecedentes, comentários* (Rio de Janeiro, Eduerj, Contraponto, 2002), 214.

associando prismas, tentando comprovar seus resultados e obter outros. No livro I, segunda parte, proposição 3 de sua *Óptica*, Newton escreve:

Verifiquei além disso que, quando a luz sai do ar, através de vários meios refratores contíguos, como através da água e do vidro, e volta daí para o ar, sejam em superfícies refratoras paralelas ou inclinadas umas em relação às outras, sempre que é assim corrigida por refrações contrárias, descobri, a luz emerge em linhas paralelas àquelas sobre as quais incidiu e depois continua a ser sempre branca. Mas, se os raios emergentes estiverem inclinados em relação aos raios incidentes, a brancura da luz emergente se tingirá gradualmente em suas bordas com várias cores, ao prosseguir o seu curso a partir do lugar de emergência.³²

Newton descobrira a aberração cromática: as diferentes luzes coloridas, de que se constitui a luz branca, não sofrem o mesmo desvio através da objetiva, a imagem azul não se forma no mesmo plano da imagem vermelha.³³

Newton estava interessado em observar as cores formadas a partir da luz e mostrar que a luz aparentemente branca era, na verdade, uma mistura de outras cores. Os experimentos realizados por Newton foram utilizados posteriormente, quando seriam observadas as linhas no espectro colorido.

Em 1802, William Hyde Wollaston (1766-1828) observou que, passando a luz solar por uma fenda e depois por um prisma, apareciam algumas linhas escuras no espectro, que ele interpretou como o limite das cores. Essas linhas são imagens da fenda do espectrógrafo em diferentes comprimentos de onda.

³² Newton, *Óptica*, 117.

³³ Verdet, *Uma história da astronomia*, 191.

Wollaston ainda percebeu que havia radiação invisível além do violeta, e a chamou de ultravioleta.³⁴

As linhas escuras, observadas por Wollaston, começaram a ser estudadas e, até 1814, o fabricante de instrumentos de vidro (lentes, prismas, microscópios e telescópios) Joseph von Fraunhofer (1787-1826) já havia contado 574 linhas escuras no espectro solar, chamadas depois de linhas de Fraunhofer. Ele provou que o fenômeno era devido a uma propriedade do espectro solar e não a uma imperfeição do aparelho que construía. Ao analisar a luz proveniente de outros corpos celestes, observou-se que o espectro de Vênus é igual ao do Sol. No entanto, constatou-se que a luz de outras estrelas, como a de Sirius, apresenta um espectro diferente. Desta forma, abriu-se o caminho para a espectroscopia estelar, que é a base da Astrofísica. Fraunhofer nomeou 324 dessas linhas: letras maiúsculas para as linhas mais fortes, e minúsculas para as mais fracas, começando com A no vermelho.³⁵ A figura 2 mostra as linhas propostas por Fraunhofer e as letras representando as principais partes do espectro:

³⁴ Figueiras. *A espectroscopia e a química*, 22.

³⁵ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 225.

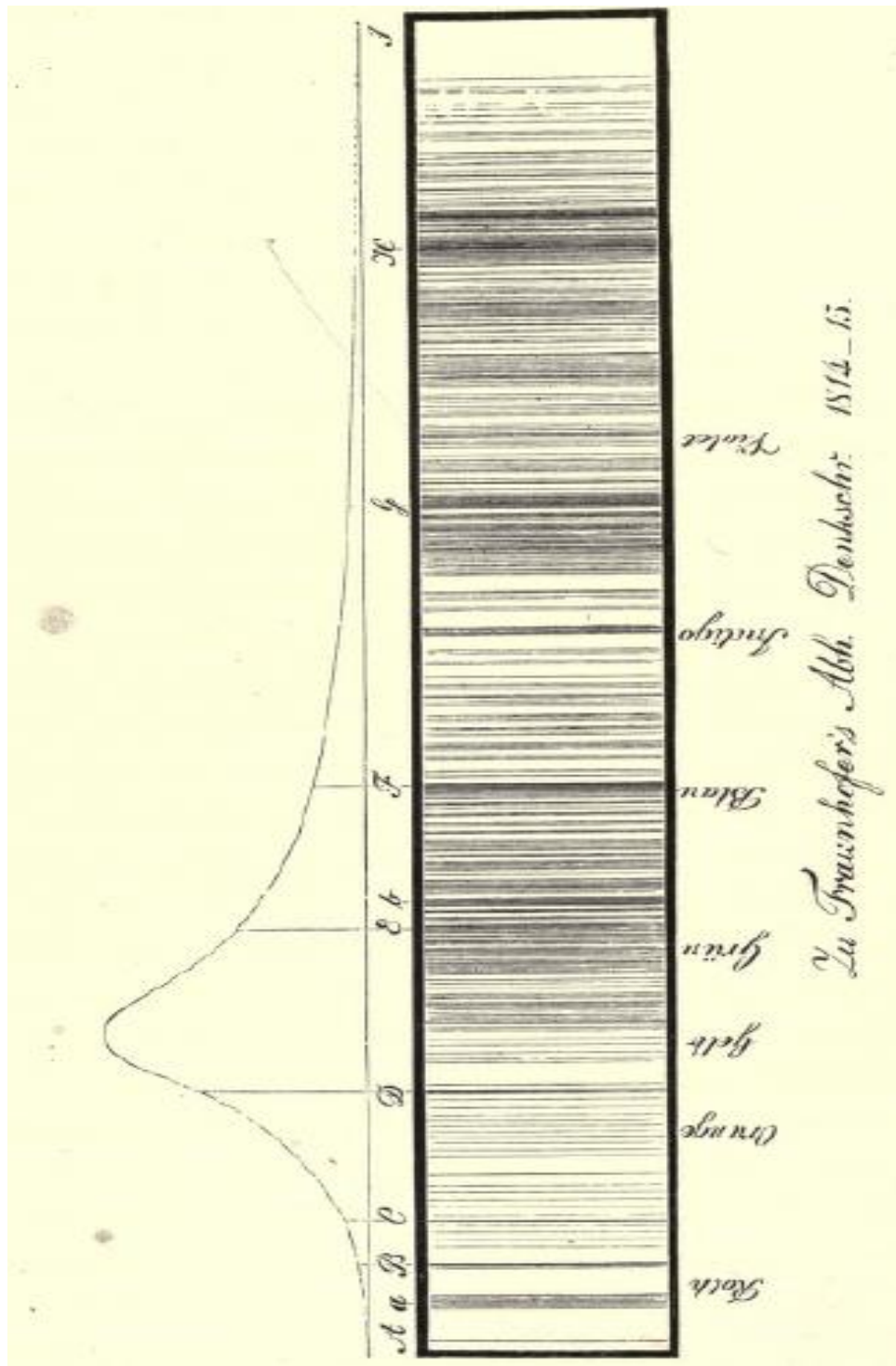


Figura 2³⁶

³⁶ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 28.

Analisando a obra “Photochemical Researches”, verificamos que os trabalhos desenvolvidos por Bunsen e Roscoe eram destinados a um público mais restrito e foram publicados num periódico científico, destinado a pesquisadores que possuíam conhecimentos aprofundados do assunto. Já o livro *Spectrum Analysis* está composto de uma série de palestras que Roscoe dera em 1868 na Sociedade dos Apotecários de Londres. As palestras em si são destinadas àqueles interessados, de uma forma geral, nas novas descobertas da ciência. A primeira apresenta conteúdo mais específico, relatando os métodos usados para a investigação da indução química causada pelos raios solares. Na segunda, Roscoe procura apresentar um estudo, todo baseado na espectroscopia, mostrando a importância da análise espectral para a identificação da composição dos materiais terrestres e celestes. Por outro lado, esta publicação traz como apêndices uma série de trabalhos de outros estudiosos, para os que quisessem se aprofundar no assunto. Estão entre os autores, Herschel, Talbot, Newton, Miller, Huggins, Fraunhofer, Wollaston, Lockyer, entre outros.³⁷

Segundo Roscoe, em seu *Spectrum Analysis*, nenhuma das descobertas da ciência moderna atraiu mais atenção ou mais admiração geral do que os resultados da aplicação da análise espectral para a química. Esse método ajudava a detectar a presença de substâncias químicas com grande precisão, auxiliando o conhecimento da composição dos materiais terrestres; também permitiu a descoberta de novos elementos químicos. A análise espectral ainda foi capaz de ultrapassar a barreira de nosso planeta e estender seu poder para o

³⁷ Roscoe, *Spectrum Analysis*.

espaço ilimitado, determinando a composição química na superfície do Sol e das estrelas fixas. Essa análise penetrou, ainda, segundo Roscoe, nos mistérios da astronomia, as nebulosas, mostrando não só a composição química, mas também as condições físicas desses corpos distantes.³⁸

Os primeiros estudos eram realizados utilizando a luz do Sol, mas posteriormente outras fontes de luz foram analisadas, como as estrelas, as fontes de luz terrestres e as faíscas elétricas. Os experimentos realizados mostraram que o espectro solar difere em alguns pontos do espectro do arco elétrico. O espectro solar não consiste somente de uma banda contínua, sem quebra da região vermelha à violeta, mas nele encontramos entre essas cores certas linhas escuras que podem ser sombras da luz do Sol, em que, em certos espaços, a cor é ausente.³⁹

Em 1859, Kirchhoff começou a estudar óptica e as raias nas linhas de Fraunhofer. Com Bunsen, estudou o espectro das chamas coloridas e registrou os raios presentes ou ausentes. Segundo ele, as linhas de Fraunhofer indicavam a qualidade do material, da atmosfera do Sol e talvez das estrelas:

Concluo com essas observações que chamas coloridas mostram linhas brilhantes e definidas em seu espectro; tais linhas enfraquecem, e raios da mesma cor que são enviados através delas fazem com que as linhas escuras tomem o lugar das claras, se uma luz suficientemente forte, deficiente nas linhas claras, for colocada atrás da chama. Além disso, concluo que as linhas escuras do espectro solar, que não são produzidas pela atmosfera da terra, são evocadas pela presença de tais

³⁸ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 2.

³⁹ *Ibid.*, 26.

substâncias como se o espectro de uma chama exibisse linhas no mesmo lugar.⁴⁰

Segundo Newton, “a luz era formada por partículas”⁴¹, mas a questão principal para Bunsen e Kirchhoff não era a composição da luz e sim a compreensão das linhas no espectro e sua utilização na ciência.

O entusiasmo era tão grande pelo avanço dos estudos em espectroscopia, que Bunsen enviou uma carta a Roscoe em 15 de novembro de 1859, relatando as novas descobertas em espectroscopia:

No momento estou envolvido numa pesquisa com Kirchhoff, que não nos deixa dormir. Ele fez uma belíssima e inesperada descoberta: a causa das linhas escuras do espectro solar. E conseguiu tanto intensificar artificialmente tais linhas no espectro solar quanto fazê-las aparecer no espectro contínuo de uma chama, sendo suas posições idênticas às daquelas das linhas de Fraunhofer. Assim, abre-se a possibilidade de se determinar a composição material do Sol e das estrelas fixas com o mesmo grau de certeza com que podemos constatar com nossos reagentes a presença de óxido de enxofre e cloro. Por esse método também é possível determinar a composição da matéria terrestre, distinguindo as partes componentes, com a mesma facilidade com que se distingue a matéria contida no Sol. Pude, por exemplo, detectar o lítio em 20 gramas de água do mar. Para registrar a presença de muitas substâncias, esse método deve ser preferido a qualquer um dos até agora conhecidos. Assim, se tivermos uma mistura de lítio, potássio, sódio, bário, estrôncio, cálcio, tudo que se tem que fazer é levar um miligrama da mistura ao nosso aparelho para determinar a presença de

⁴⁰ Obituário de Kirchhoff, anônimo, *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, 372.

⁴¹ Newton, *Óptica*, 86.

todas as substâncias acima indicadas por mera observação. Algumas dessas reações são extremamente delicadas. Detectei cinco milésimos de miligrama de lítio com a maior facilidade e precisão. Descobri a presença deste metal em quase todas as amostras de potassa.⁴²

No ano em que Robert Bunsen escreveu a carta a Roscoe falando sobre os trabalhos em espectroscopia, a quarta parte do estudo “Photochemical Researches” estava sendo publicada. Somente quatro anos mais tarde, em 1863, a quinta parte da obra saiu a público. Os estudos em espectroscopia se estenderam por muitos anos, com Bunsen e Kirchhoff e com outros importantes pesquisadores. Isso nos leva a crer que os estudos em fotoquímica e espectroscopia foram desenvolvidos paralelamente.

Outra série de experimentos começava a ser realizada por Bunsen e Kirchhoff. O espectro formado pelo Sol apresentava as linhas escuras propostas por Joseph von Fraunhofer em 1814, e essas linhas, de acordo com a posição em que eram encontradas, mostravam a presença de substâncias químicas em análises realizadas em materiais terrestres e também de fora da Terra.

1.4 O ESPECTROSCÓPIO

O nome desse novo campo da ciência chamado análise espectral se deu quando se passou a utilizar espectroscópios, instrumentos usados para decompor a luz de uma fonte em várias cores. A palavra espectroscopia

⁴² Roscoe, “Bunsen Memorial Lecture”, 531.

apareceu em diferentes décadas no final do século XIX e Herbert Dingle concluiu que o primeiro registro da palavra ocorreu em 1860.⁴³

As figuras 3 e 4 mostram o espectroscópio de Bunsen:

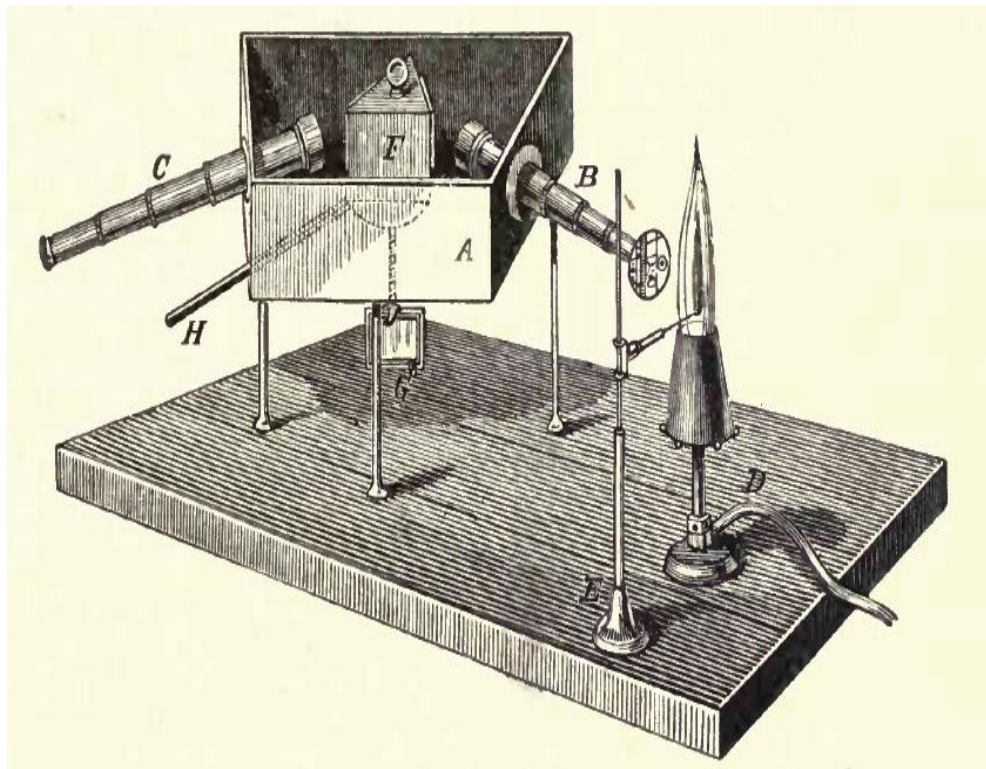


Figura 3⁴⁴

⁴³ Dingle. "A hundred years of spectroscopy" , 202

⁴⁴ Roscoe, *Spectrum Analysis*,59.

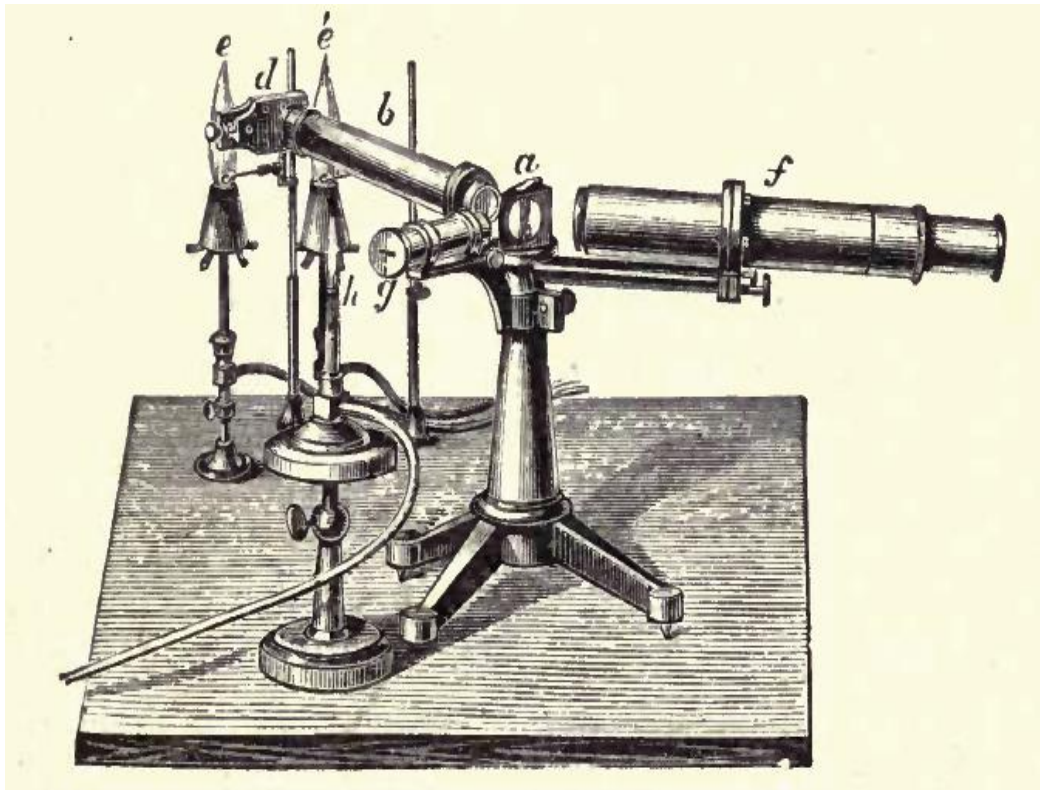


Figura 4⁴⁵

Como foi proposto por alguns pesquisadores, a luminosidade produzida pelo contato da substância analisada com a chama era direcionada ao espectroscópio. Um formato simples de espectroscópio adotado por Bunsen (figura 3) consiste em que um prisma comum é colocado em uma caixa, um telescópio é fixado em um dos lados dessa caixa e um tubo é colocado no outro lado. Numa extremidade desse tubo, é feita uma fenda e, na outra, é colocada uma lente, obtendo assim um espectro puro através de raios paralelos. Esse tubo é chamado de colimador. O colimador foi proposto pelo professor William Swan (1841-1898) em 1856. De acordo com o experimento, a substância a ser examinada é colocada na chama, e a luz, após passar pela fenda, incide sobre o prisma. Há então uma divisão das partes constituintes e formam-se raios

⁴⁵ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 59.

coloridos, que passam pelo telescópio, são ampliados e incidem sobre a retina.⁴⁶ Na figura 4, um espectroscópio proposto por Carl August von Steinheil (1801 – 1870), usava duas chamas, e o aparato era arranjado para que fossem observados dois espectros, um sobre o outro. O objetivo dessa sobreposição era observar através da coincidência das linhas, formadas por dois espectros de fontes de luz diferentes, se a substância examinada realmente era aquela prevista.⁴⁷

Kirchhoff utilizou um equipamento um pouco diferente daquele usado por Bunsen, como se vê na figura 5.

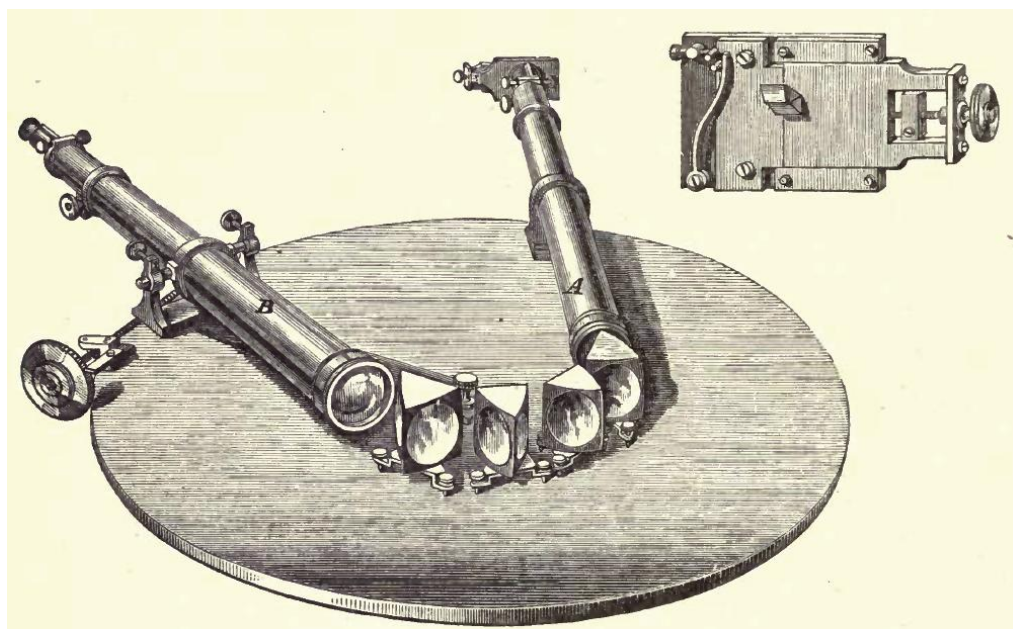


Figura 5⁴⁸

Ele usou quatro prismas, um atrás do outro, em uma mesa horizontal de ferro fundido. Em seu experimento há uma fenda que pode ser alargada por meio de um parafuso. Na fenda é colocado um pequeno prisma, que deixa os

⁴⁶ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 60.

⁴⁷ *Ibid.*

⁴⁸ *Ibid.*, 62.

espectros sobrepostos. A luz passa pela fenda; os raios são paralelamente processados pela lente fixada no final do tubo, passam então pelos quatro prismas, têm suas partes constituintes divididas, incidem no telescópio, e chegam onde o olho está colocado. Este é considerado o mais simples, completo e delicado formato de espectroscópio.⁴⁹

Kirchhoff e Bunsen tentavam melhorar os resultados encontrados. É possível perceber algumas diferenças nos espectroscópios, mas o objetivo era o mesmo: analisar a qualidade das substâncias colocadas na chama.

Para usar o espectroscópio eram necessárias algumas habilidades. O observador precisava tomar muitos cuidados com a ação direta da luz do Sol na retina; precisava realizar os experimentos longe da iluminação externa, de modo que os resultados não fossem alterados; era necessária uma fonte de luz produzida por algo isento de outros materiais químicos; o ângulo entre o colimador, os prismas e o telescópio deveria ser muito preciso; e ainda a análise deveria ser feita com muita cautela, pois o instrumento tornaria visível aquilo que não era possível ver.

Na região central do equipamento, havia um suporte de ferro fundido, onde era fixado o prisma, com um ângulo de refração de 60°. Um tubo era preso na direção desse prisma, e no fim desse tubo, mais próximo do prisma, era colocada uma lente, enquanto o outro lado era fechado com uma placa em que havia uma fenda vertical. A base estava fixada de modo que fosse possível um movimento plano horizontal. Dois outros tubos também vinham fixados paralelamente à base do equipamento. Um desses tubos era um telescópio, enquanto o outro apresentava uma lente colocada na extremidade próxima do prisma e, no outro

⁴⁹ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 62

extremo, estava uma fenda, pela qual podia ser vista, através do telescópio, a reflexão proveniente da superfície do prisma. Essa escala era uma cópia de uma escala milimétrica (figura 8), a qual teria sido produzida sobre 1/15 da dimensão original. Desse modo, somente uma estreita faixa, sobre a qual as divisões e os números eram gravados, podia ser vista. Somente a metade superior da fenda era vista. A metade inferior ficava coberta pelo prisma de vidro, pelo qual a luz da lâmpada era enviada por total reflexão. Através da fenda os raios passavam livremente, porém uma pequena tela colocada sobre o prisma impedia qualquer luz de passar pela sua parte superior. Para ajudar o arranjo na observação do espectro, duas fontes de luz, uma sobre a outra, podiam facilmente determinar se as linhas coincidiam ou não.⁵⁰ A figura 6 pode auxiliar na compreensão da descrição do espectroscópio.

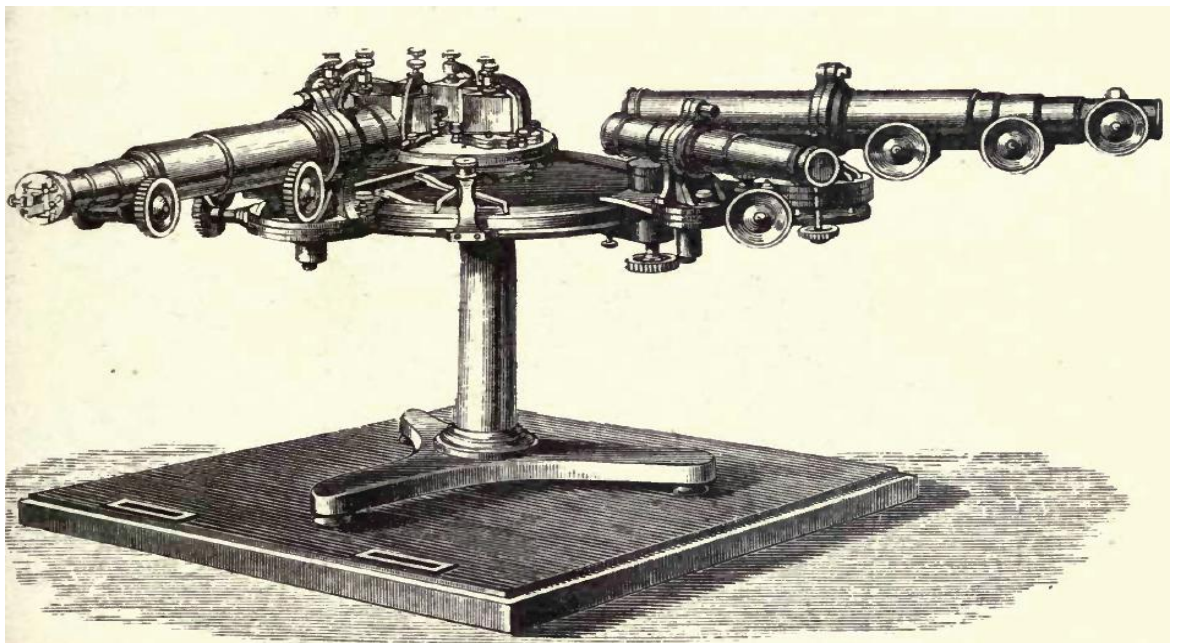


Figura 6⁵¹

⁵⁰ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 95

⁵¹ *Ibid.*, 225

O uso do aparelho se dava da seguinte forma: o telescópio ficava parafusado a certa distância do objeto claramente visto. Cuidados deviam ser tomados para que os parafusos fossem afrouxados antecipadamente para uma possível regulagem. O tubo então era colocado no lugar com o eixo em linha reta. A fenda, desenhada até ela ser distintamente vista olhando através do telescópio, e este último, fixado por movimento dos parafusos. Assim o meio da fenda podia ser visto acima do campo de visão. Depois o prisma era colocado em uma placa de latão e preso por parafusos na posição marcada. Se o eixo do tubo fosse direcionado para a chama de uma vela, o espectro da chama seria visto na metade inferior do campo do telescópio, movendo-o através de um certo ângulo, em volta do eixo da base. Quando o telescópio estava colocado na posição, o outro tubo era preso no braço pertencente a ele, e este girava num ângulo através do eixo da base. Quando a luz incidia na escala dividida, a imagem da escala podia ser vista através do telescópio, refletida da face mais próxima do prisma. Essa imagem era trazida exatamente no ponto central. Virando o tubo em seu eixo, havia a possibilidade de alterar a posição da escala, fazendo com que ela coincidissem com as linhas do espectro.⁵²

Pelos parafusos, a largura da fenda podia ser regulada, de acordo com a intensidade da luz e o grau de pureza do espectro. Para cortar a luz exterior, um pano escuro era colocado sobre o prisma e os tubos. O grau de iluminação adequado para o espectro sob exame podia então ser facilmente encontrado colocando essa chama em diferentes distâncias.⁵³

⁵² Roscoe, *Spectrum Analysis*, 95.

⁵³ *Ibid.*, 97.

A utilização da chama era indispensável na análise espectral dos elementos, pois as substâncias eram nela colocadas, de modo que o material incandescente passasse a emitir a luz. Porém se fosse utilizada qualquer tipo de chama, poderia haver interferência no resultado. Assim, Bunsen desenvolveu um queimador, em que, misturando um gás inflamável com uma quantidade regulável de oxigênio, era possível obter uma chama sem cor e com alta temperatura, podendo assim obter resultados de extrema qualidade. O queimador foi popularizado com o nome de Bunsen. O Bico de Bunsen serviu para que ele elaborasse várias reações na chama, como as primeiras descrições da constituição de uma chama de gás não luminoso, a volatilidade de muitos sais e a determinação de quantidades de metais e não metais.⁵⁴

John Hudson, em sua obra: *The History of Chemistry*, relata que Bunsen iniciou seus trabalhos em Heidelberg, e percebendo que o equipamento que utilizava para fazer as análises emitia muita luz, interferindo na coloração das chamas emitidas pelos sais, desenvolveu seu queimador que diminuía a quantidade de luz emitida pela queima do gás, obtendo resultados mais precisos.⁵⁵

A figura 7 mostra o Bico de Bunsen, muito importante para a época e usado até hoje em grande parte dos laboratórios:

⁵⁴ Roscoe, "Bunsen Memorial Lecture", 540

⁵⁵ Hudson, *The History of Chemistry*, 125

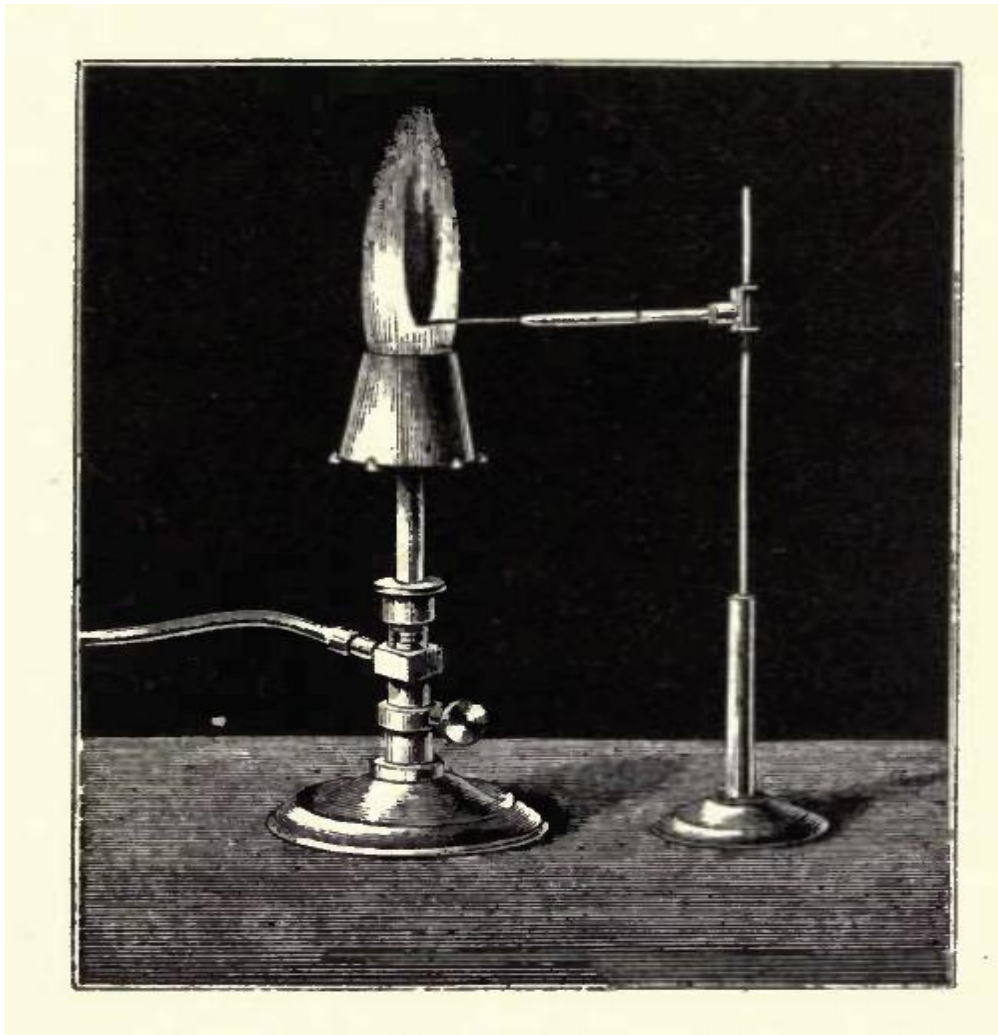


Figura 7⁵⁶

Bunsen foi o responsável pela criação de outros equipamentos e experimentos. O queimador, conhecido como Bico de Bunsen, talvez tivesse tido outros inventores. Talvez esses equipamentos tivessem sido guardados para trazer grande fortuna. Bunsen não tinha ambição monetária; ele pensava na aplicação científica e isso é um excelente traço de seu caráter.⁵⁷

Ele ficou internacionalmente famoso como um especialista em análises de gases e de recuperação de energia durante processos gasosos.

⁵⁶ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 55.

⁵⁷ Roscoe, "Bunsen Memorial Lecture", 548.

No espectro formado pela mistura de gases, inúmeras linhas irão surgir, porém elas não aparecem ao mesmo tempo. As linhas referentes aos gases mais voláteis, como o sódio, surgem primeiro no espectro, e as demais linhas vão surgindo gradativamente.⁵⁸

Materiais que apresentavam mais de um tipo de substância ocasionavam no espectro linhas que podiam confundir o observador. Como cada uma das substâncias apresentava um grupo de linhas, algumas delas coincidiam com as de outros elementos. Para isso alguns experimentos foram feitos utilizando duas fontes de luz com materiais diferentes em cada uma, de modo que se observasse uma possível sobreposição das linhas espectrais. O aparato montado com duas fontes de luz pode ser verificado na figura 4 desta pesquisa.

Foi observada uma aparente coincidência entre as linhas azuis do lítio e as linhas azuis do estrôncio, somente quando o vapor desse metal era intensamente aquecido. Sobre essa observação Kirchhoff diz:

Algumas linhas são invisíveis a uma determinada temperatura tornando-se visíveis quando o gás fica incandescente. A descoberta também é estendida na análise do espectro do estrôncio e do bário. Não só surgem novas linhas a altas temperaturas, mas também amplas faixas, característica dos metais e dos compostos metálicos.⁵⁹

⁵⁸ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 75.

⁵⁹ Roscoe & Clifton, *On the Effect of Increased Temperature Upon the Nature of the Light by Vapour of Certain Metals or Metallic Compounds* citado em Henry Roscoe, *Spectrum Analysis*, 204.

Com esse método é possível determinar as cores de vários sais. Quando adicionados à chama soluções de cloreto de sódio, potássio, lítio, bário, estrôncio e cálcio, as cores processadas dessas substâncias são evidentes.⁶⁰

Uma importante observação é que os sais de sódio, quando colocados na chama, tornam-se amarelos e todos os sais de lítio tornam-se carmesim, e essa propriedade de emitir um tipo peculiar de luz é um dos meios pelos quais várias substâncias podem ser detectadas.⁶¹

Vale lembrar que as linhas produzidas pelos gases incandescentes nunca mudam de lugar se a temperatura for alterada. Mas para que elas apareçam, é necessário chegar a uma temperatura que torne o gás incandescente.⁶²

A qualidade da luz emitida pelos corpos sólidos varia de acordo com a temperatura, diferentemente dos corpos gasosos, em que não há essa alteração.

Podemos perceber que ocorrem diferentes linhas em diferentes posições no espectro de acordo com fatores como: a temperatura de aquecimento, o estado físico do material, as condições atmosféricas, a presença de interferências externas, a presença de mais de um tipo de material ou materiais desconhecidos.

A análise espectral é muito delicada, permitindo identificar, por exemplo, uma porção muito pequena de sódio. O sódio está presente no ar e muitos materiais, quando levados à chama, apresentam as linhas amarelas características desse elemento. O lítio está presente em alguns tipos de minerais, nas rochas, no mar, nos rios, no sangue humano, nas plantas, no leite, no tecido muscular. O estrôncio é encontrado no calcário de diferentes períodos geológicos. O cálcio pode ser facilmente detectado na cal. O céσιο e o rubídio foram encontrados nas águas minerais de Baden-Baden e Dürkheim, na

⁶⁰ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 56.

⁶¹ *Ibid.*, 55.

⁶² *Ibid.*, 73.

Alemanha, e por serem os primeiros elementos descobertos pela análise espectral, receberão destaque mais adiante. O Tálcio foi descoberto por William Crookes (1832-1919) em 1861, sendo encontrado em pirritas de ferro e apresentava propriedades parecidas com a do chumbo. Crookes dava sequência às pesquisas em espectroscopia e, em uma de suas análises, um corpo apresentou um belo verde na chama. Ele provou que essa luz verde representava um novo elemento. Para essa nova substância ele deu o nome de Tálcio, de *tallus*, galho verde.⁶³ O índio foi descoberto pelos pesquisadores Reich e Richter e se caracteriza pelas cores azul e índigo no espectro.⁶⁴

Já havia muitos elementos químicos conhecidos na época, mas a espectroscopia tornou possível a identificação de elementos já conhecidos em amostras de materiais e a descoberta de grande número de outros elementos, a partir da descoberta do céσιο e do rubídio, como veremos a seguir.

1.5 A DESCOBERTA DE DOIS NOVOS ELEMENTOS QUÍMICOS: O CÉSIO E O RUBÍDIO

A análise espectral ajudaria na determinação de novos elementos, como os dois novos metais alcalinos descobertos em 1860 por Bunsen. Depois de fazer seus primeiros experimentos com a análise espectral, Bunsen selecionou os materiais da evaporação de uma grande quantidade de água mineral. Separando todos os outros corpos, ele levou alguns desses materiais à chama e encontrou, examinando pelo espectroscópio, uma mistura de sais que apresentava algumas linhas brilhantes nunca observadas antes. Ele evaporou quarenta e quatro

⁶³ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 111.

⁶⁴ *Ibid.*, 71.

toneladas dessa água, em que se encontravam pequenas quantidades desses novos metais. Nomeados por ele, o Césio apresentava linhas na região azul do espectro e o Rubídio na região vermelha.

Bunsen percebeu então que esses dois novos elementos eram encontrados em águas minerais das fontes localizadas em Durkheim e em Baden-Baden, ambas na Alemanha. Analisou nessas fontes de água mineral as quantidades existentes de inúmeros elementos químicos conhecidos, e ainda, desses dois novos elementos. O cloreto de rubídio foi encontrado na proporção de 0,00021 partes para 1000 de água, enquanto o cloreto de césio na proporção de 0,00017 partes para 1000 de água.

Após as descobertas dos novos elementos, testes foram realizados e encontraram o rubídio na beterraba, no tabaco, nas cinzas de madeira de carvalho, no café, no chá e em alguns vegetais.⁶⁵

A seguir, a figura 8 representa o mapa dos espectros dos metais alcalinos e alcalinos terrosos:

⁶⁵ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 108.

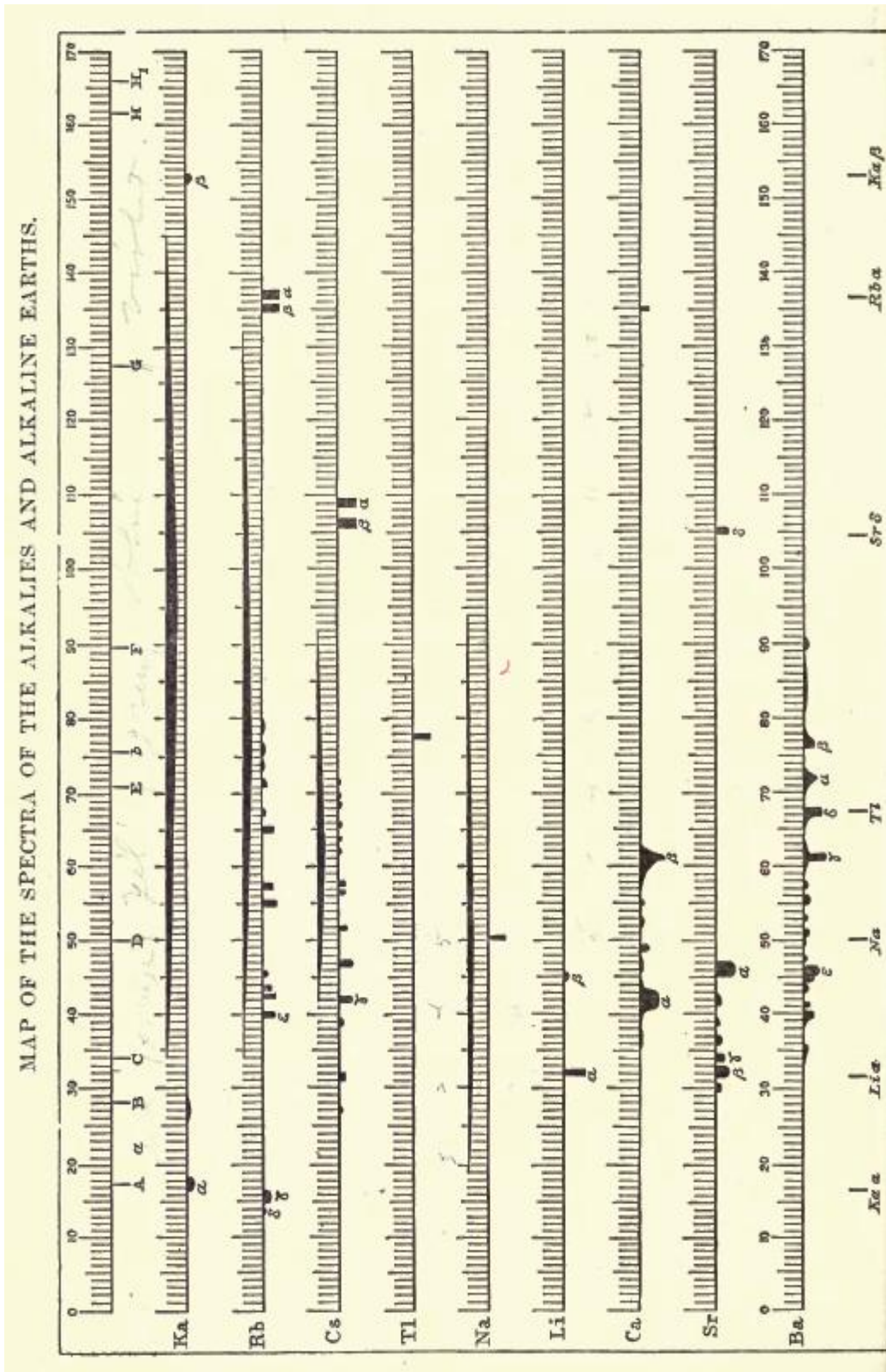


Figura 8⁶⁶

⁶⁶ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 67.

A figura 9 mostra o espectro de metais alcalinos e alcalinos terrosos, proposto por Bunsen e Kirchhoff:

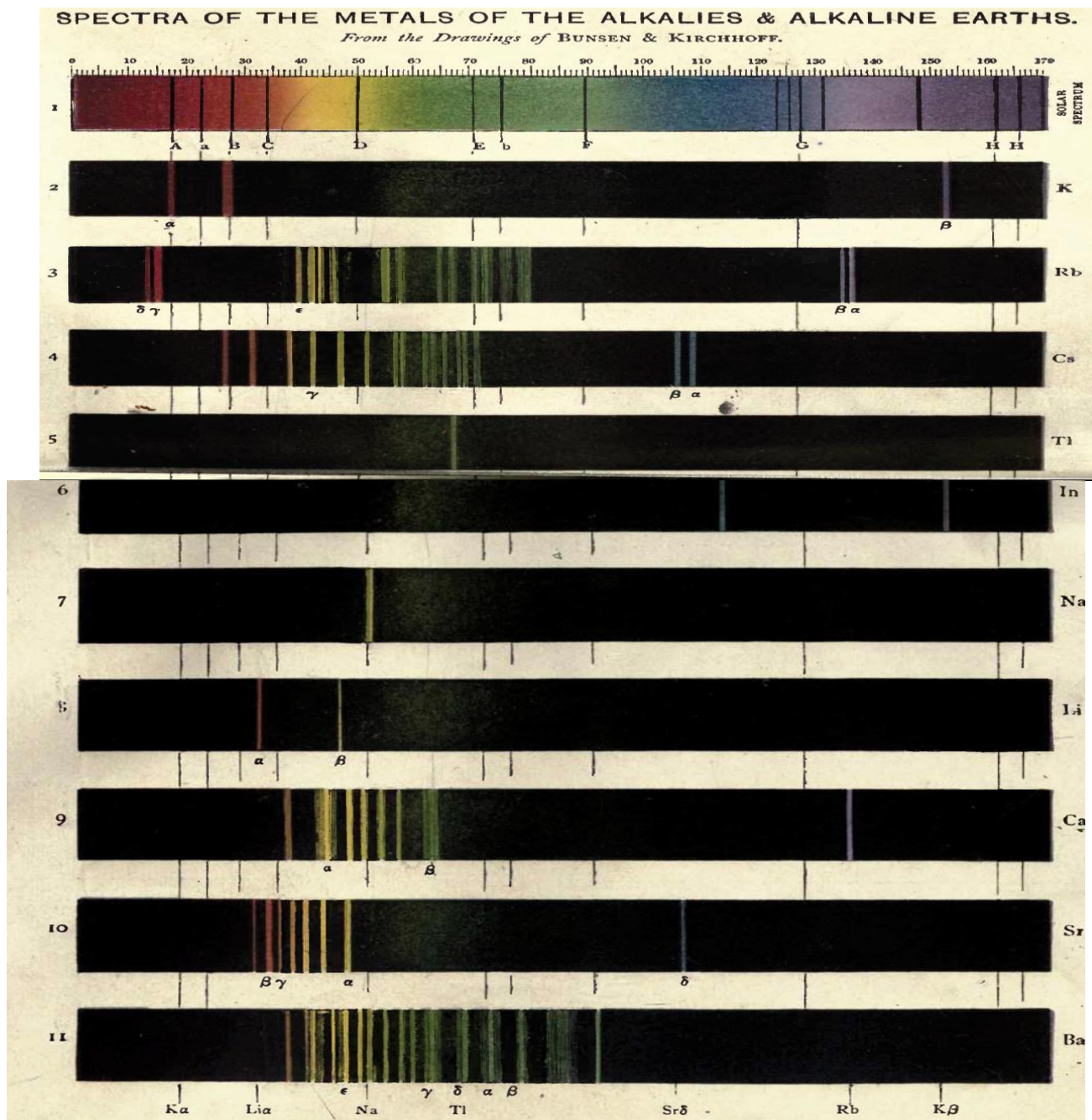


Figura 9⁶⁷

⁶⁷ Roscoe, *Spectrum Analysis*, contra-capá.

Amostras analisadas podem apresentar mais de um tipo de elemento químico. Um sal pode apresentar, de um elemento, uma quantidade dez mil vezes maior que outro sal, e ambos serão detectados da mesma forma, pois as linhas formadas apresentam ângulos de refração diferentes e, portanto, nenhum elemento será mascarado por esse tipo de análise.⁶⁸

Em 1845, William Allen Miller (1817-1870) também realizou alguns experimentos analisando o espectro que algumas substâncias produziam quando colocadas na chama e chegou a resultados próximos desses encontrados por Bunsen e Kirchhoff. As investigações realizadas por Miller não tiveram a atenção merecida.⁶⁹

1.6 A REVERSÃO DAS LINHAS

O sódio foi um elemento importante no estudo da espectroscopia, por estar presente em muitos materiais, e porque, quando aquecido, apresenta duas linhas bem definidas, que se tornam facilmente visíveis no espectro. Também foi analisando primeiramente o sódio que Bunsen e Kirchhoff mostraram o fenômeno da reversão das linhas. Vejamos como isso se deu.

A partir de diversas observações, eles perceberam a presença de linhas escuras no espectro formado por uma fonte de luz. Também perceberam que, dependendo do tipo de luz usada, apareciam linhas brilhantes exatamente nos locais onde as linhas escuras deveriam estar. Para esclarecer essa dúvida, Kirchhoff obteve o espectro solar com suas linhas escuras, colocou uma chama produzindo um vapor incandescente de sódio na frente da fenda de entrada do

⁶⁸ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 69.

⁶⁹ *Ibid*, 104.

espectroscópio, o que o levou a perceber a mudança das linhas escuras, que representavam o sódio, para linhas brilhantes. O fenômeno pode ser facilmente explicado com uma suposição de que a chama de sódio absorve raios de mesmo grau de refrangibilidade⁷⁰ e é perfeitamente transparente para todos os outros raios. A luz formada pelo Sol em algum momento encontra o vapor de sódio e é parcialmente absorvida. Quando uma nova luz deixa o sódio incandescente, aparecem os raios brilhantes no espectro. Bunsen e Kirchhoff posteriormente puderam verificar e analisar a reversão das linhas de outros metais como o potássio, o estrôncio, o cálcio e o bário.⁷¹

Ou seja: uma fonte de luz emite um espectro contínuo, um gás incandescente produz linhas brilhantes no espectro de acordo com o tipo de elemento químico presente na amostra e, se o espectro contínuo passar por um gás com temperaturas mais baixas, esse gás absorve a luz e emite linhas escuras.

Como pudemos perceber, analisando as obras escritas por Bunsen, Kirchhoff, Roscoe e outros pesquisadores, percebemos que a fotoquímica desenvolvida por Bunsen e Roscoe está diretamente relacionada com os estudos em espectroscopia realizados por Bunsen e Kirchhoff. A fotoquímica analisava os efeitos que a luz exercia nas substâncias e necessitava de um método de decomposição da luz para localizar a região em que os raios eram quimicamente ativos.

A decomposição da luz direcionou os estudos de Bunsen, em parceria com Kirchhoff, para a determinação, através desse método, da composição química das substâncias, demonstrada por linhas que apareciam no espectro.

⁷⁰ Refrangibilidade é o mesmo que refração, ou seja, desvio dos raios luminosos.

⁷¹ Kirchhoff, *Researches on the Solar Spectrum and the Spectra of the Chemical Elements*, 16.

Bunsen e Kirchhoff fizeram uma síntese dos experimentos realizados até o momento e desenvolveram o espectroscópio e os métodos para determinar a composição química das substâncias.

No capítulo seguinte serão analisados os estudos posteriores em espectroscopia, os desdobramentos nas análises dos materiais terrestres, as análises realizadas no espectro e nos fenômenos solares e ainda a importância da espectroscopia para os estudos astronômicos.

2. OS DESDOBRAMENTOS DA ESPECTROSCOPIA E SUA IMPORTÂNCIA PARA A ASTROFÍSICA

A espectroscopia se desenvolvia e muitos pesquisadores a utilizavam de diversas maneiras, como na análise de vários tipos de sais e de materiais orgânicos, na tentativa de identificar substâncias ainda não conhecidas. Contribuiu ainda com a astronomia, já que se observavam aspectos químicos e físicos no Sol, planetas e estrelas fixas.

2.1 O DESENVOLVIMENTO DA ESPECTROSCOPIA A PARTIR DOS ESTUDOS DE BUNSEN E KIRCHHOFF

Após as investigações sobre as linhas espectrais, Kirchhoff pesquisou a porção verde no brilho emitido por faíscas elétricas dos eletrodos de ferro e encontrou um grande número de linhas brilhantes que coincidiam com as linhas escuras no espectro solar. Ele acreditava que existiam grupos de linhas brilhantes presentes nas faíscas, que também podiam ser encontradas no espectro solar. Concluiu então que a presença de ferro na superfície do Sol e em meteoros era possível:

De acordo com as investigações de Wheatstone, Masson, Angstrom e outros, sabemos que no espectro de uma faísca elétrica aparecem linhas brilhantes, dependendo da natureza do metal nos quais ocorrem as faíscas. E podemos supor que essas linhas coincidem com aquelas existentes no espectro de uma chama de temperatura muito alta, se colocarmos nela o mesmo metal de forma adequada. Ao examinar a porção verde do

espectro de uma faísca elétrica entre eletrodos de ferro, tenho encontrado um grande número de linhas brilhantes, nas quais vejo coincidências com as linhas escuras no espectro solar. Em linhas únicas a coincidência é dificilmente estabelecida com segurança, mas vejo que, em muitos grupos, as linhas brilhantes no espectro de uma faísca correspondem às linhas escuras no espectro solar. Eu me arrisco a dizer que essas coincidências não são meramente aparentes. Se a faísca é, por exemplo, de um eletrodo de cobre, essas linhas brilhantes são diferentes. Justificando minha conclusão de que entre os componentes da atmosfera incandescente do Sol é encontrado o ferro, chegamos à conclusão de que é considerada frequente a ocorrência de ferro na Terra ou em rochas de meteoro.⁷²

Nos experimentos realizados por Kirchhoff com faíscas elétricas, foi utilizado o método proposto por Van der Willigen e, para verificar o espectro das faíscas, foi usada uma bobina de indução de Ruhmkorff⁷³, contando com baterias, sendo produzidas faíscas de 0,3 metros de comprimento. A bateria empregada consistia de três ou quatro elementos de carbono-zinco de grande superfície. A luz produzida pela faísca era lançada em direção ao prisma no espectroscópio.⁷⁴

Roscoe, ao realizar seus experimentos com as faíscas elétricas, questionou a possibilidade de determinar a presença de metais pesados através da análise espectral: “Como podemos determinar a presença de cobre, de ouro,

⁷² Obituário de Kirchhoff, anônimo, *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, 374.

⁷³ Aparelho construído por Heinrich Daniel Ruhmkorff (1803-1877) em 1852, que utiliza pilhas para produzir uma corrente de baixa intensidade.

⁷⁴ Kirchhoff, *Researches on the Solar Spectrum and the Spectra of the Chemical Elements*, 9.

de prata, de zinco, de ferro? Como podemos volatilizar esses materiais de modo que possamos obter a luz peculiar de cada um?”⁷⁵

A resposta à última pergunta estava na utilização de uma faísca elétrica que volatilizava tais metais. Ainda que Wollaston tenha sido o primeiro a analisar a natureza das faíscas elétricas, foi Michel Faraday (1791-1867) quem declarou que a faísca elétrica consistia unicamente de partículas do material dos pólos e do meio através do qual ela passa. Portanto, de acordo com Roscoe, “a faísca é a ignição do material existente em seu corpo”.⁷⁶

A espectroscopia se expandia cada vez mais. Era possível analisar o espectro das faíscas e, além de saber a composição química do material que as formava, era possível comparar com o espectro de corpos fora da Terra, identificando metais pesados.

De acordo com Kirchhoff, entre aqueles que dedicaram suas pesquisas à observação do espectro das cores na chama, não se podia deixar de citar William Herschel (1738-1822) e William Henry Fox-Talbot (1800-1877). E, talvez, ainda, o professor William Allen Miller, que havia publicado, em um número da *Chemical News*, em 19 de abril de 1862, o primeiro diagrama do espectro das chamas, apresentando ligeiro sucesso.⁷⁷ Sobre os trabalhos de Miller, William Crookes observou:

Não podemos comparar com um diagrama de cores que foi originalmente ilustrado, mas nós podemos assegurar a nossos

⁷⁵ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 113.

⁷⁶ *Ibid.*, 114.

⁷⁷ Kirchhoff, “Contributions Towards the History of Analysis and the Analysis of the Solar Atmosphere”, 251.

leitores [...] que o diagrama do espectro dado pelo professor Miller é o mais exato em vários aspectos.⁷⁸

Para Crookes, mesmo com muitos outros diagramas produzidos, aquele feito por Miller possui desenhos destinados a representar muito bem o espectro do estrôncio, do bário e do cálcio.⁷⁹

Encontramos na obra *Spectrum Analysis*, entre os apêndices, um trabalho de Kirchhoff: “Contributions Towards the History of Spectrum Analysis”, em que está registrada uma das falas de Talbot sobre a espectroscopia:

A chama do sulfato e do nitrato contém raios vermelhos que me parecem notáveis na natureza. Esses raios vermelhos parecem possuir uma refrangibilidade definitiva e apresentar características de sais de potássio, e os raios amarelos, dos sais de sódio. Esses sais, apesar de terem um poder de iluminação, são detectados somente com um prisma. E se admitíssemos que sempre o prisma demonstrasse a homogeneidade dos raios e as cores existentes na chama, estes raios indicariam a formação ou a presença de compostos químicos definidos. [...] Eu não posso negar que a análise óptica pode distinguir porções de duas substâncias com muita certeza, como qualquer outro método conhecido.[...] Então os raios amarelos podem indicar a presença de sódio, mas eles frequentemente aparecem onde o sódio supostamente não estaria presente.”⁸⁰

Talbot ainda mencionou que “a luz amarela da queima do sulfato, descoberta por Herschel, é idêntica à luz da chama da lâmpada-espírito⁸¹ com pavio de sal, e ele tendia a acreditar que a luz amarela obtida quando o sal era

⁷⁸ Kirchhoff, “Contributions Towards the History of Analysis and the Analysis of the Solar Atmosphere”, 255.

⁷⁹ Ibid.

⁸⁰ Ibid., 251.

⁸¹ Chama produzida pela queima de álcool ou outro combustível líquido. Retirado do site: <http://www.thefreedictionary.com/spirit+lamp>. Data da consulta 28/09/2009.

colocado na chama ocorria devido à cristalização do sódio em água, mas não era fácil explicar por que os sais de potássio não produzem o mesmo efeito.”⁸²

Portanto as linhas amarelas eram uma prova positiva da presença de sódio, comprovando as pesquisas de Herschel e Talbot. Os diversos modos em que as linhas eram produzidas levaram à conclusão de que a posição delas dependia da composição química da chama. Também foi verificado que uma porção de cloreto de cálcio na chama causava linhas vermelhas e verdes no espectro.⁸³

Quando o brilho era produzido por mais de um metal, o espectro apresentava as linhas de cada um deles. Às vezes, as linhas apareciam com menos distinção, mas sempre em seus respectivos lugares. No caso do zinco e do estanho as linhas apareciam no azul, um pouco deslocadas para o final do violeta. A conclusão foi que as linhas brilhantes das faíscas elétricas obedecem outras leis. Elas dependem da separação química dos constituintes do gás.⁸⁴

William Swan foi o primeiro a demonstrar experimentalmente que a maior invariabilidade ocorre nas linhas amarelas, que podem aparecer indicando a presença de compostos de sódio. Em sua pesquisa clássica *On the spectra of the flames of the hydrocarbons*, Swan concluiu que na maioria das chamas examinadas aparecem linhas amarelas, portanto existem pequenas quantidades de sódio na maioria das amostras. Ele ainda investigou amostras de hidrocarbonetos e, comparando-as, verificou que em todos os espectros produzidos as linhas brilhantes são idênticas. Em alguns casos aparecem linhas que não eram observadas no espectro de Bunsen. O brilho ocorria de acordo

⁸² Kirchhoff, “Contributions Towards the History of Analysis and the Analysis of the Solar Atmosphere”, 252.

⁸³ Ibid., 253.

⁸⁴ Ibid., 254.

com a proporção de carbono para hidrogênio na amostra. Também foi verificado que a presença de oxigênio no espectro não alterava as linhas dos hidrocarbonetos.⁸⁵

Percebemos que muitos pesquisadores desenvolveram estudos em diversas áreas com o auxílio da espectroscopia. Talbot possuía conhecimentos matemáticos, físicos e químicos, porém seus principais trabalhos estavam ligados à fotografia. Crookes utilizou a análise espectral desenvolvida por Bunsen e Kirchhoff em muitos de seus trabalhos. Miller contribuiu com a ciência em seus estudos sobre espectroscopia e astroquímica ao determinar a composição das estrelas. George Gabriel Stokes (1819-1903) também teve importante papel na análise espectral. A espectroscopia foi utilizada pelo professor Stokes para analisar amostras de sangue e seu artigo sobre esse assunto foi publicado na *Royal Society* em 1864.⁸⁶ Os estudos em astrofísica e a análise espectral das amostras de sangue serão analisados mais adiante.

Havia algumas tentativas de alterar as medidas dos espectros nas tabelas desenvolvidas por Kirchhoff, mas algumas observações demonstraram que o aparato desenvolvido para analisar o espectro mostrava com clareza suas linhas. Algumas dessas linhas, como na região A, eram bem definidas e os grupos de linhas na região do G também, mas com menos distinção.⁸⁷

Alguns tipos de substâncias, não somente gases, mas também líquidos e substâncias sólidas, exerciam um poder de absorção seletiva sobre a luz branca, quando ela passava através deles, por esse motivo surgem as linhas escuras, como já foi mencionado no primeiro capítulo. Um grande número de

⁸⁵ Kirchhoff, "Contributions Towards the History of Analysis and the Analysis of the Solar Atmosphere", 255.

⁸⁶ Wilder, "Sketch of Professor Stokes", 744.

⁸⁷ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 143.

investigações sobre a absorção seletiva estava aberto e muitos pesquisadores desenvolveram estudos sobre essas bandas, inclusive na análise de fluidos animais.

A figura 10 mostra a absorção seletiva de dois gases coloridos: a primeira mostra as bandas escuras vistas quando a luz branca passa pelos vapores violetas do iodo e a segunda mostra as primeiras bandas observadas por David Brewster (1781–1868) nas fumaças vermelhas do tetróxido de nitrogênio, e ambas foram demonstradas por August Kundt (1839-1894).⁸⁸

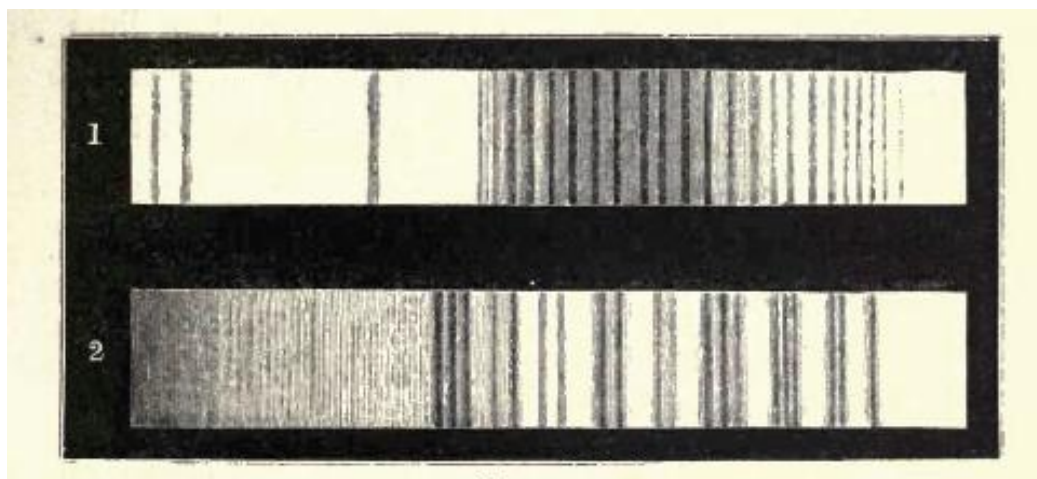


Figura 10⁸⁹

Alguns gases coloridos semelhantes ao cloro não demonstravam qualquer absorção de bandas escuras, enquanto outras bandas, de gases incolores, semelhantes ao ar e vapores aquosos, exerciam um notável poder de absorção seletiva e exibiam um espectro cheio de linhas escuras. Talvez a mais impressionante formação dessa absorção de linhas no caso dos líquidos era da

⁸⁸ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 177.

⁸⁹ *Ibid.*

solução incolor de um sal chamado didímio⁹⁰. Todos os sais de didímio possuíam um poder de absorção de luz branca.⁹¹

A espectroscopia também auxiliou Stokes na análise de amostras de sangue⁹² e um fator interessante é que pequenas quantidades de óxido carbônico em solução exibiam um conjunto de bandas peculiar. O envenenamento por óxido carbônico (a queima do carvão produz esse gás) pode ser detectado por essas bandas apresentadas no espectro do sangue e esse método foi muito importante nas pesquisas toxicológicas.⁹³

Um valioso método de análise das várias bandas de absorção de materiais coloridos no sangue foi desenvolvido por Ray Lancaster. Ele utiliza um instrumento no qual todos esses fenômenos de absorção podem ser observados com precisão. Esse instrumento se resume em um microscópio conectado a um espectroscópio. A figura 11 mostra a visão externa do equipamento e a figura 12 detalha sua parte interior:

⁹⁰ Didímio: Suposto corpo formado por Praseodímio e Neodímio, considerado há poucos anos como um elemento químico. Stwertka, *A Guide to the Elements*, 151.

⁹¹ Bunsen, "Inversion of the Absorption bands in the spectrum of didymium", 246.

⁹² Stokes, "On the Reduction and Oxidation of the Colouring Matter of the Blood", 391.

⁹³ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 183.

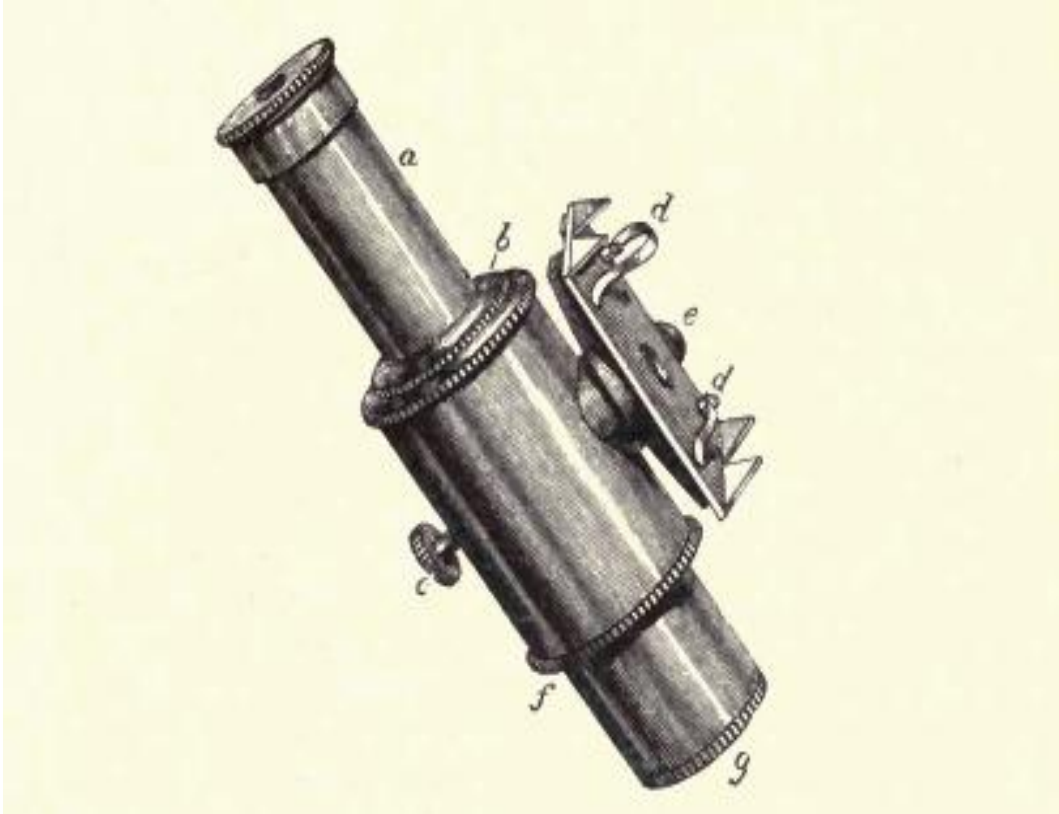


Figura 11⁹⁴

⁹⁴ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 183

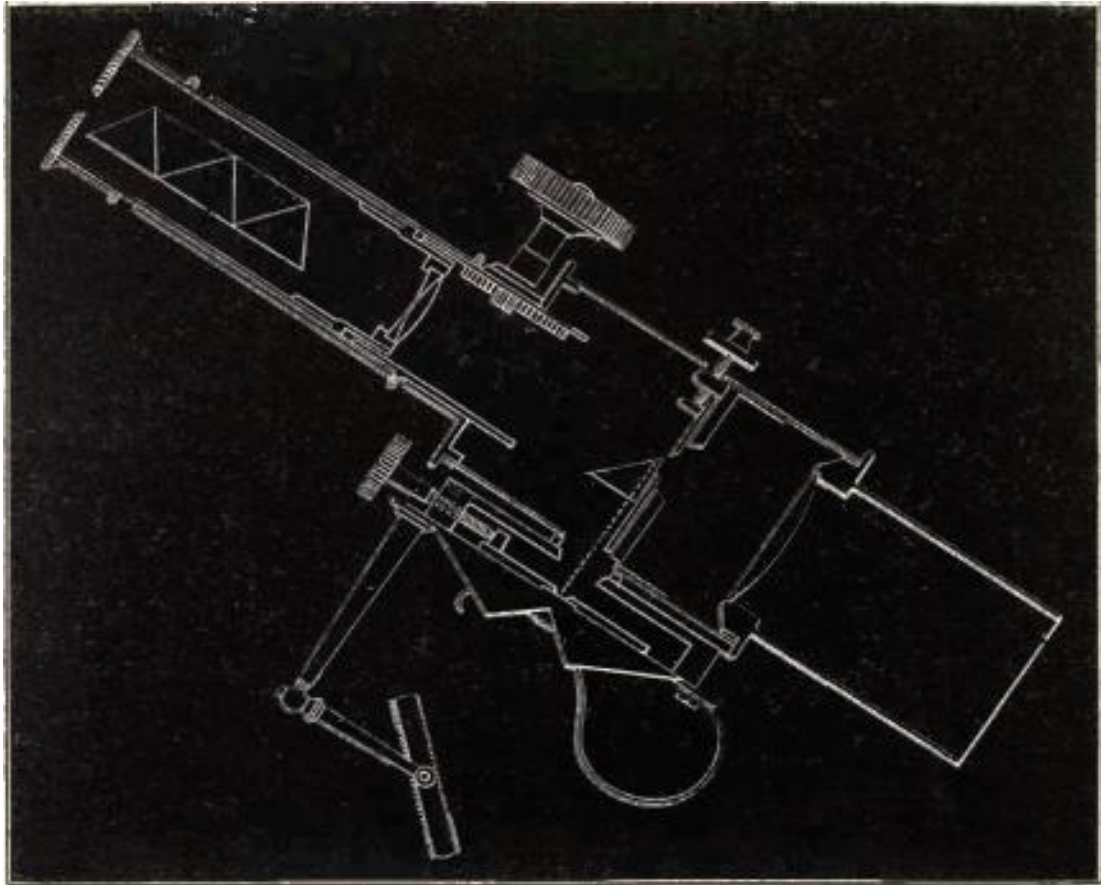


Figura 12⁹⁵

A ocular era composta por prismas que permitiam que os raios refratados passassem em uma linha reta para o olho. Os espectroscópios eram denominados instrumentos de visão direta. Esse aparato mostra a estrutura da ocular que poderia caber na palma da mão.⁹⁶

Outro fenômeno a ser analisado pela espectroscopia é a fosforescência. Era possível produzi-la artificialmente utilizando um quarto escuro e pedaços de fósforo, como as letras que brilham com uma luz pálida. Também era possível usar infusórios (microorganismos formados pela decomposição das plantas), vaga-lumes, outros animais e plantas com fosforescência. Alexandre Edmond

⁹⁵ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 184.

⁹⁶ *Ibid.*, 185.

Becquerel (1820-1891) examinou cuidadosamente o espectro desses corpos fosforescentes, e percebeu que muitos deles apresentam um tipo de luz peculiar, que provocavam quebras no espectro, ou bandas de diferentes raios coloridos. Mas vale lembrar que cada substância fosforescente apresentava linhas em diferentes regiões do espectro.⁹⁷ O artigo “On the Influence of Heat Phosforescence”, de Fiebig, narra as investigações de Becquerel sobre o comportamento dos corpos fosforescentes em relação ao calor.⁹⁸

As linhas espectrais ocorriam devido às diferenças nos índices de refração da luz, cada uma das cores sofre desvio em um ponto diferente. Os índices de refração foram posteriormente classificados por comprimentos de onda. As linhas identificadas por Fraunhofer recebiam letras nas regiões mais intensas do espectro, como já foi demonstrado no primeiro capítulo, e entre essas linhas havia outra divisão com números, que seriam seus comprimentos de onda. Esse mapeamento foi desenvolvido por Anders Jonas Ångström (1814–1874), que utilizou o mapa dos espectros desenvolvido por Kirchhoff e adicionou uma escala numerando os comprimentos de onda.⁹⁹

William Marshall Watts (1836-1919), utilizando a idéia de comprimento de onda proposta por Ångström, demonstrou que o sódio, a uma temperatura de 2000°C, apresentava linhas de comprimento de onda 5889¹⁰⁰ e 5687, e quando a temperatura atingia 3000°C, apareciam linhas nos comprimentos de onda 5155 e 5152.¹⁰¹

⁹⁷ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 188.

⁹⁸ Fiebig, “On the Influence of Heat on Phosphorescence”, 335.

⁹⁹ Ångström, *Recherches sur le Spectre Solaire*, 35.

¹⁰⁰ Na obra, não estão representadas as unidades de medida do comprimento de onda. Hoje utilizamos Angström (Å). 1 Å = 10⁻¹⁰ m.

¹⁰¹ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 164.

Para esclarecer alguns aspectos referentes à formação das linhas, Kirchhoff completa:

Eu encerro essa seção com as seguintes observações: A posição das linhas brilhantes, ou, para falar mais precisamente, a máxima de luz no espectro de um vapor incandescente, não depende da temperatura, da presença de outros vapores ou de qualquer outra condição exceto da constituição química do vapor. Para validar essa conclusão, Bunsen e eu temos comprovado com nossos próprios experimentos feitos para um objetivo especial, e eu tenho confirmado por muitas observações feitas com um instrumento extraordinariamente delicado já descrito. A aparência do espectro de algum vapor pode, todavia, ser muito diferente sob diferentes circunstâncias. Até a alteração de massa de um gás incandescente é suficiente para efetuar as mudanças nas características do espectro. Se a espessura de um filme de vapor, cuja luz está sendo examinada, for aumentada, a intensidade luminosa de todas as linhas aumenta, mas em diferentes razões. Por virtude de um teorema, o qual será considerado nesta seção, a intensidade das linhas brilhantes aumenta mais lentamente que aquelas linhas menos visíveis. A impressão que a linha produz no olho depende da largura e do brilho. Por isso, pode acontecer que uma linha com menos brilho, apesar de brilhar mais do que uma segunda, é menos visível quando a massa do gás incandescente é pequena, mas torna-se mais distintamente vista do que a segunda linha quando a espessura do vapor é aumentada. Realmente se a luminosidade de um espectro inteiro for reduzida até que somente a mais impressionante das linhas seja vista, o espectro parecerá totalmente mudado quando a massa do vapor for alterada. Mudanças de temperatura aparecem para produzir um efeito similar na alteração da massa de um vapor incandescente. Se a temperatura for aumentada, não há desvio da máxima de luz observada, mas a intensidade das linhas aumenta

diferentemente, aquelas nas quais são mais claramente vistas a uma alta temperatura não são mais visíveis que a baixa temperatura.¹⁰²

Kirchhoff não deixava nenhuma dúvida. Todas as questões levantadas por inúmeros pesquisadores sobre as condições das linhas foram testadas e comprovadas. Nenhum outro fator influenciava, segundo ele, o surgimento ou desaparecimento de qualquer nova linha senão a composição química da substância analisada.

Mais tarde algumas pesquisas demonstraram que para um mesmo material existe mais que um espectro. O ar atmosférico é composto por nitrogênio, oxigênio e hidrogênio. O espectro do hidrogênio em uma determinada pressão apresentava quatro linhas brilhantes, mas com uma redução de pressão a linha vermelha desaparecia gradativamente¹⁰³. Adolph Wullner (1835-1908) aprofundou suas pesquisas na variação das linhas do espectro do hidrogênio e concluiu que diferenças de temperatura devem ser consideradas no caso desse gás. A causa das diferenças na observação do espectro ocorria devido ao poder emissivo da substância quando era alterada a temperatura.¹⁰⁴

Não era difícil perceber como os estudos na espectroscopia começaram a se desenvolver rapidamente. Essa análise chamou a atenção de muitos pesquisadores que estudaram o comportamento das faíscas elétricas, as linhas aparentes em diversos sais, a presença de elementos químicos em materiais orgânicos, a luz emitida por corpos fosforescentes. Também foram realizados diversos estudos refazendo algumas análises já realizadas por Bunsen e

¹⁰² Roscoe, *Spectrum Analysis*, 208.

¹⁰³ *Ibid.*, 192.

¹⁰⁴ *Ibid.*, 193.

Kirchhoff, com o intuito de comprovar ou aperfeiçoar os resultados, além de organizar mapas e diagramas dos espectros.

A descoberta de grande importância consistia na estabilização de um novo sistema de análises químicas, de um novo poder de investigação da constituição da matéria. Com ela, seria possível analisar as substâncias terrestres e os corpos distantes, como o Sol e as estrelas fixas. Considerando que durante muitos anos a produção no campo da literatura esteve estéril, agora a Alemanha apresenta trabalhos de grande qualidade na ciência natural.¹⁰⁵

Era importante a criação de uma imagem científica cultural nos estados alemães. Em 1848, uma relação existente entre a ciência e a indústria desenvolvia estudos pensando em melhorias na agricultura, para que não houvesse falta de alimentos. Entre 1825 e 1851, um programa de química na agricultura começou a se desenvolver na Alemanha, e nesse programa estavam práticas de laboratório e ensinamentos químicos. O avanço significativo nos estudos científicos alemães ocorreu após as descobertas realizadas por Bunsen e Kirchhoff na análise espectroquímica.¹⁰⁶

Os autores ainda afirmavam que essas descobertas demonstravam enorme fertilidade no campo da pesquisa. Segundo eles, importantes resultados estavam sendo antecipados inclusive na medicina, na aplicação de análises dos processos das águas minerais, pois poderiam trazer qualidades terapêuticas.¹⁰⁷

Fica evidente a disputa que ocorria na Europa em relação ao desenvolvimento científico, literário, medicinal, e a ciência natural trouxe um avanço significativo para a Alemanha.

¹⁰⁵ Kirchhoff & Bunsen, "Chemical analysis of substances by observations on their spectra", 150.

¹⁰⁶ James. "Science as a Cultural Ornament: Bunsen, Kirchhoff and Helmholtz in Mid-Nineteenth-Century Baden", 2.

¹⁰⁷ Kirchhoff & Bunsen, 154.

2.2 A ANÁLISE DO ESPECTRO SOLAR

Desde que Newton percebeu a separação das cores provenientes da luz branca, a primeira fonte de luz analisada foi a proveniente do Sol. Wollaston e Fraunhofer também observaram o espectro formado pela luz solar. Posteriormente, Bunsen e Roscoe fizeram experimentos tentando compreender a ação química da luz do Sol.

A química solar, chamada assim por Roscoe, era um novo caminho para o estudo dos corpos distantes. Roscoe ainda dizia que a luz do Sol difere daquela emitida por materiais sólidos ou líquidos. Considerando os experimentos com a luz solar, se o espectro solar fosse projetado em uma tela, encontraríamos nas bandas brilhantes uma série de linhas escuras ou sombras.¹⁰⁸

A análise da luz emitida por um astro podia, além de determinar sua composição química pelo espectro formado, verificar a presença de atmosfera e analisar um possível deslocamento do corpo celeste. A presença de linhas escuras no espectro dava indícios de que existiam gases que possivelmente estavam absorvendo parte da luz emitida, sugerindo a presença de uma atmosfera.

A análise do espectro solar auxiliou na descoberta de um novo elemento químico. Algumas linhas eram visíveis no espectro e em nenhum outro espectro produzido por fontes terrestres. Tratava-se do gás que recebeu o nome do deus grego do Sol, hélio. Futuramente o hélio foi identificado na Terra por Joseph

¹⁰⁸ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 223.

Norman Lockyer (1836-1920), reafirmando a importância do espectroscópio para a análise das condições físicas e químicas do Sol.¹⁰⁹

A identificação desse novo elemento no Sol ocorreu quando Lockyer e Frankland analisaram a cromosfera solar durante um eclipse em 1868 e observaram a não coincidência das linhas. Pierre Janssen (1824-1907) também havia percebido a ocorrência dessas novas linhas no espectro.¹¹⁰

Em relação aos constituintes químicos do Sol, Roscoe questionou:

É verdade que se têm pontuado as diferenças entre as várias partes do espectro solar, mas como isso conecta as análises que nossos estudiosos realizam com o método pelo qual substâncias químicas podem ser detectadas ou examinadas com um alto grau de precisão?¹¹¹

As linhas também mostravam a presença de cálcio, magnésio, sódio, cromo, níquel, cobalto, bário, cobre, zinco. Outros metais como ouro, prata, mercúrio, alumínio, cádmio, estanho, chumbo, antimônio, arsênio, estrôncio e lítio não eram visíveis na atmosfera solar de acordo com as observações de Kirchhoff.¹¹²

Se as linhas que apareciam no espectro mostravam a presença de elementos químicos, seria possível, somente através da luz emitida por corpos distantes, determinar também aspectos físicos. Essas análises poderiam auxiliar futuros estudos sobre a composição e origem do universo.

Algumas linhas presentes no Sol coincidiam com as linhas do espectro de alguns metais, e assim os experimentos de Kirchhoff mostravam alguns aspectos sobre as coincidências das linhas:

¹⁰⁹ Dingle. "A hundred years of spectroscopy", 205.

¹¹⁰ Young. "Helium, its identification and properties", 339.

¹¹¹ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 50.

¹¹² Kirchhoff, *Researches on the Solar Spectrum and the Spectra of the Chemical Elements*, 21.

1. A luz emitida pelo vapor luminoso do sódio é homogênea. O espectro do sódio consiste de um par de linhas amarelas brilhantes;
2. Esse par de linhas do sódio coincide exatamente com o par de linhas D observadas por Fraunhofer;
3. O espectro da luz de Drummond¹¹³ é contínuo; não apresenta linhas escuras ou espaços;
4. Se entre o prisma e a luz de Drummond é colocado soda na chama, um par de linhas escuras idênticas às linhas D de Fraunhofer é produzido;
5. Se, em vez de usar a luz de Drummond, nós passarmos a luz do Sol através da chama de sódio, nós vemos que a linha D torna-se muito mais distinta do que quando a luz do Sol é empregada sozinha;
6. A chama do sódio tem, portanto, o poder de absorver alguns tipos de raios emitidos. Ela é opaca para os raios amarelos D;
7. Por isso nós concluímos que o vapor luminoso do sódio na atmosfera solar causa duas linhas escuras D de Fraunhofer; a luz desprendida do corpo solar mostra um espectro contínuo;
8. Kirchhoff estabelece que todas as linhas brilhantes produzidas no espectro de certos metais coincidem exatamente com linhas escuras no espectro solar;
9. Por isso é certo que essas linhas metálicas brilhantes devem ser conectadas em algum caminho com as linhas escuras solares;
10. A conexão é a seguinte: cada linha escura coincidente com o espectro solar é causada pela absorção efetuada na atmosfera solar pelo vapor incandescente daquele metal, pelo qual é dada a linha brilhante correspondente.¹¹⁴

¹¹³ Um tipo de fonte de luz desenvolvida por Thomas Drummond, utilizada em pesquisas, que emite raios de luz mais concentrados. McLennan Ferguson. "Memoir of Thomas Drummond", 62.

¹¹⁴ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 247.

Em 1862 Kirchhoff e Bunsen publicaram um artigo no periódico: *The Edinburgh Review or Critical Journal*, com o título: “Chemical analysis of substances by observations on their spectra”, ilustrado, em duas partes: a primeira mostrando os aparatos empregados e a outra comparando o espectro de seis substâncias com o espectro solar.¹¹⁵

O artigo narra todo o desenvolvimento da espectroscopia. Iniciou-se pelos estudos de Newton, Wollaston e Fraunhofer, passou pelos experimentos realizados por Bunsen e Kirchhoff e chegou a estudos posteriores na análise química celestial.

Relacionando as análises realizadas em amostras de materiais terrestres e análises realizadas na luz proveniente do Sol, foi verificada uma coincidência nas linhas brilhantes emitidas por faíscas elétricas e as linhas escuras formadas pelo espectro solar em relação à posição das linhas do ferro no espectro. Kirchhoff apresentou explicações para o acontecimento:

O fenômeno pode ser explicado pela suposição de que os raios de luz formados pelo Sol tenham passado através dos vapores de ferro e tenham sofrido absorção. Também é possível que esses vapores de ferro estejam na atmosfera do Sol ou da Terra, mas não é fácil entender como nossa atmosfera contém tal quantidade de vapor de ferro de modo que possa produzir a absorção das linhas no espectro solar.¹¹⁶

Kirchhoff ainda completa que “é possível que na superfície solar existam outros metais que também são encontrados na superfície da Terra como o cromo, o níquel, o cobalto e outros”.¹¹⁷

¹¹⁵ Obituário de Kirchhoff, anônimo, *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, 375.

¹¹⁶ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 242.

¹¹⁷ *Ibid.*, 244.

Relatando sobre a constituição física do Sol, Kirchhoff diz:

Sobre a ocorrência das linhas escuras no espectro solar, devemos considerar que o Sol possui um núcleo luminoso produzindo um espectro contínuo, o brilho no qual excede certo limite. A mais provável suposição que podemos fazer sobre a constituição do Sol é que ele apresenta um núcleo sólido ou líquido aquecido por uma temperatura brilhante, rodeado por uma atmosfera com uma temperatura pouco menor. Esta suposição está de acordo com a teoria de Laplace referente à formação do sistema planetário. Se a matéria está concentrada em vários corpos celestes, existe também uma contínua massa de vapor em contração, na qual os planetas, o Sol e as luas foram formados, todos esses corpos devem possuir principalmente a mesma constituição principal.¹¹⁸

Pierre Simon Laplace (1749-1827) foi um astrônomo e físico francês que dedicou uma parte de seus estudos na compreensão da mecânica celeste, da mecânica clássica, da teoria das probabilidades e dos buracos negros. Segundo Laplace, de acordo com a análise espectral, os corpos celestes devem possuir basicamente a mesma composição.

Ao analisar a luz, os estudos, em algumas vezes, estavam voltados para a constituição do Sol. O espectroscópio sempre foi um instrumento importante para auxiliar essa análise e a primeira etapa da extensão desse conhecimento foi as observações das protuberâncias ou chamas vermelhas, as quais durante um eclipse total eram vistas lançadas da superfície solar a enormes alturas com elevadas temperaturas. A existência das chamas prova que a atmosfera incandescente do Sol se estende a uma altura muito acima da porção visível. Esses estudos auxiliaram na determinação da composição da cromosfera.

¹¹⁸ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 252.

Abaixo, na figura 13, imagens das proeminências ou chamas vermelhas acima da superfície solar, observadas em 1º de julho de 1869.¹¹⁹

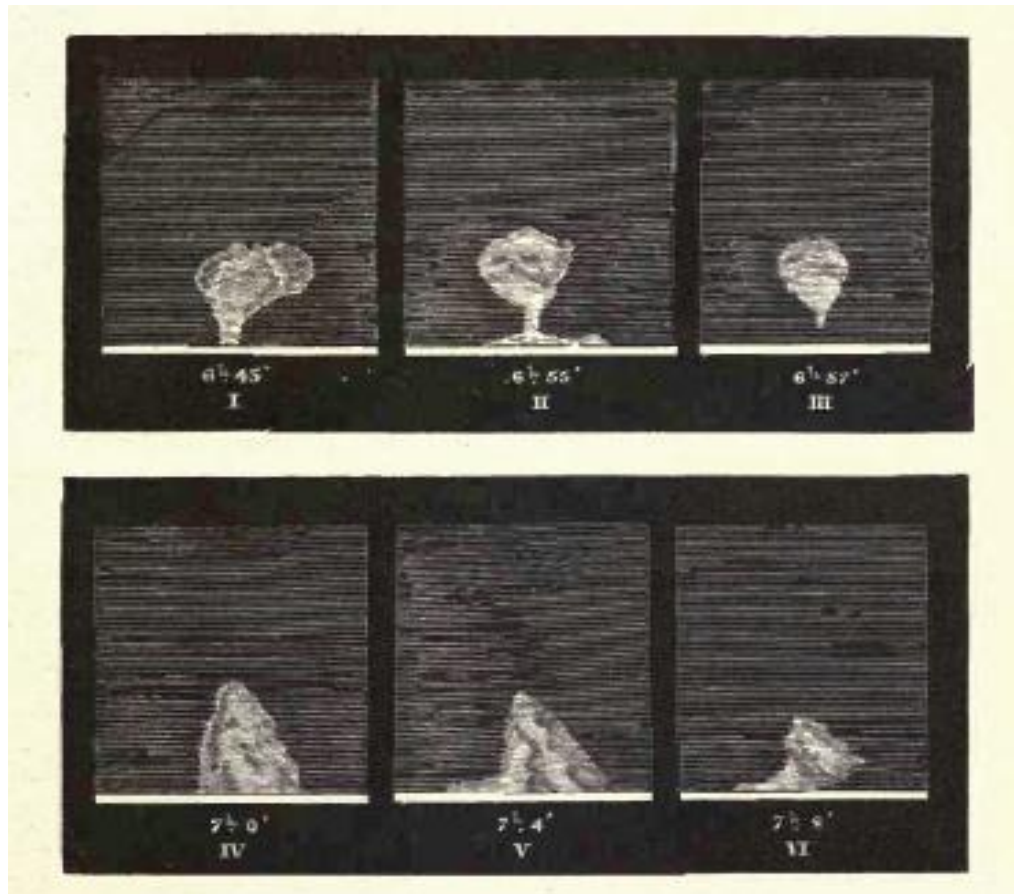


Figura 13¹²⁰

Em 19 de setembro de 1868, no eclipse observado na Índia, a espectroscopia auxiliou na observação e identificação de linhas brilhantes no espectro. Lockyer afirmou que as proeminências observadas na superfície solar também poderiam ser identificadas durante todo o dia. No ano seguinte, Huggins observou através do espectroscópio as formas das proeminências solares. A

¹¹⁹ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 255.

¹²⁰ *Ibid.*

classificação seria proeminência de chama e de sombra. O espectro também demonstrou a presença de cálcio, hidrogênio e hélio no Sol.¹²¹

As observações durante o eclipse proporcionavam a pesquisadores observar manchas, tornados, ou seja, variações na atmosfera solar, e ainda com o auxílio do espectroscópio, era possível analisar a luz emitida por esses fenômenos ocorrentes na região mais externa do Sol.

Astrônomos supunham que as manchas solares eram buracos na fotosfera, através dos quais os corpos escuros do Sol podiam ser vistos. Kirchhoff provou que essa teoria não estava correta, na medida em que as partes inferiores do Sol deveriam ser quentes e brancas. Ele formulou a hipótese de que as manchas eram nuvens flutuando na atmosfera. Subsequentemente, pesquisas modificaram essa visão de Kirchhoff, mostrando que as manchas solares eram cavidades com gases incandescentes de temperatura reduzida.¹²²

A temperatura alterava a observação de algumas linhas no espectro do Sol. Quando as linhas de sódio, magnésio e bário eram observadas nas manchas solares, elas apareciam mais espessas do que as linhas escuras de Fraunhofer, enquanto que, quando analisadas na cromosfera, apareciam mais finas.¹²³

Alguns pesquisadores como John Hudson e James Riddick Partington, quando mencionam a origem das descobertas em espectroscopia, referem-se a pontos de trabalhos de Bunsen, mas é importante lembrar que em seus trabalhos Kirchhoff teve grande importância, pois fez uma explanação das linhas de Fraunhofer no espectro solar.¹²⁴

Kirchhoff faz uma observação sobre as descobertas da análise espectral:

¹²¹ Forbes, *History of Astronomy*, 124.

¹²² Roscoe, *Spectrum Analysis*, 263.

¹²³ *Ibid.*, 300.

¹²⁴ Roscoe, "Bunsen Memorial Lecture", 530.

É maravilhoso pensar que nós somos capazes de dizer com segurança, através de uma sequência de observações, que corpos comuns na Terra estão presentes na atmosfera do Sol, a uma distância de cento e cinquenta milhões de quilômetros, e mais extraordinariamente que a existência de metais como o ferro e o sódio, podem ser determinados sem sombra de dúvida.¹²⁵

2.3 A INFLUÊNCIA DA ESPECTROSCOPIA PARA A ASTROFÍSICA

Sabendo que uma análise espectroscópica necessitava somente de luz e não era necessário nenhum tipo de contato com a fonte luminosa em questão, pesquisadores começaram a desvendar não somente os segredos químicos e físicos do Sol, mas também de outras fontes de luz, como as demais estrelas, as nebulosas, as auroras e outros fenômenos observados no céu.

Como vimos, Kirchhoff, William Huggins (1824-1910) e William Allen Miller contribuíram muito para a análise de corpos celestes. Eles apontaram a importância do estudo em questão para o desenvolvimento da química.¹²⁶ Além deles, Lockyer também desenvolveu estudos relevantes sobre a química celestial.

George Forbes cita em sua obra *History of Astronomy* que, assim como os estudos realizados por Galileo Galilei com o telescópio, outros realizados por pesquisadores, como Huggins e Secchi, com o espectroscópio, trouxeram uma evolução na concepção de universo.¹²⁷

¹²⁵ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 2.

¹²⁶ Huggins & Miller, "On the Spectra of Some of the Nebulae", 437.

¹²⁷ George Forbes, *History of Astronomy*, 1909, 113.

William Huggins e William Allen Miller observaram o espectro das estrelas fixas, verificando que as linhas espectrais das estrelas coincidiam, de acordo com a tabela de Kirchhoff, com os espectros dos elementos terrestres.

Em estudos realizados por Huggins e Miller, o espectro de cinquenta estrelas foi comparado com o espectro de vários elementos terrestres, e perceberam que as estrelas são corpos quentes, com constituição similar à do Sol, e contendo muitas das substâncias encontradas na Terra. Em 1864, Miller reportou à *Royal Society* o resultado de suas observações do espectro dos planetas Vênus, Marte, Júpiter e Saturno, mas a luz de Urano era muito fraca para ser observada com o espectroscópio.¹²⁸

De acordo com Huggins, as observações mostravam diferenças entre os corpos que refletem a luz do Sol, como a Lua e os planetas e aquelas que são fontes de luz original, como as estrelas e nebulosas.¹²⁹

A espectroscopia auxiliava na identificação de características físicas na superfície dos planetas. Em Júpiter, linhas eram vistas indicando a presença de uma atmosfera que absorvia os raios de luz. Algumas linhas correspondiam com as da superfície terrestre, e provavelmente indicavam a presença de vapores similares com aqueles que estão sobre a Terra. O espectro de Saturno era fraco, mas as linhas detectadas eram similares às de Júpiter. As linhas eram mais fracas em seus anéis e demonstravam que o poder de absorção sobre os anéis era menor que o poder da atmosfera ao seu redor. Em Marte eram observadas linhas na parte mais refrangível do espectro. A ausência de linhas observadas em

¹²⁸ Huggins, "Sketch of William Huggins", 261.

¹²⁹ Huggins, "Results of Spectrum Analysis Applied to Heavenly Bodies Celestial Spectroscopy the New Astronomy", 371.

Vênus pode ser porque a luz provavelmente é refletida, não na superfície planetária, mas nas nuvens mais acima.¹³⁰

O espectro de absorção de planetas distantes tem sido examinado, Urano por Huggins e Netuno por Padre Angel Secchi (1818-1878). Huggins descreveu o espectro de Urano como sendo fraco e contínuo, mas era possível identificar a presença das linhas representando o hidrogênio. O espectro de Netuno se assemelhava com o de Urano e era caracterizado por três bandas escuras, uma na região azul, outra próximo à linha B e uma última entre as linhas D e B.¹³¹

Como a Lua e os planetas apresentavam um brilho que é somente uma reflexão da luz do Sol, não era possível que fosse revelada a natureza do material de que eles eram compostos, somente características de suas atmosferas.

Huggins percebeu uma pequena variação em algumas observações em relação à tabela criada por Kirchhoff, mas ele justificava as variações pelas mudanças de temperatura. Reexaminando a tabela, Huggins encontrava frequentemente dois ou mais metais com o mesmo número, e achava que poderia ter ocorrido um erro de observação. Assim ele selecionou um grande número de linhas de metais mais comuns e comparou-as. Huggins criou, então, uma nova tabela.¹³² As figuras 14 e 15 ilustram uma parte da tabela desenvolvida por Huggins:

¹³⁰ Huggins, "Results of Spectrum Analysis Applied to Heavenly Bodies Celestial Spectroscopy the New Astronomy", 372.

¹³¹ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 323.

¹³² Huggins, "On the Spectra of Some of the Chemical Elements", 151.

Solar.	Air.	Na.	K.	Ca.	Ba.	Sr.	Mn.	Tl.	Ag.	Te.	Sn.	P.
a 322						365 ² s						
			418 ² s 426 ² s									
B 449	...	...	...	...	441.7 s 486.7 s	444 ² s 480 ² s	...	...	...	...	459 ² s 491 ² s	
				515.7 s 523.7 s 532.7 s								
	N 565.5 ²	...	...	...	...	549.5 s 563 ¹ s	...	...	...	545.3 ⁴ n	...	
C 589.5	H 589.5 ⁴ h	...	...	...	...	573 ¹ s 595 ² s	...	596 ⁴ s	...	...	581 ¹ s	
					608 ¹ s	619 ² s	...	...	...	...	...
	N 629.5 ²	...	...	622.5 s 6251.5 s 637.7 s	621.5 ⁷ s	...	...	...	...	...	...	629 ¹ s 641 ¹ s
				642 ² s 649.7 s	645 ¹ s	...	...	...	...	...	643 ⁷ s	667 ¹ s
			727.5 s	655 ² s 690.2 s 709.2 s	...	669 ⁴ s 681 ¹ s 684 ¹ s	...	...	...	657.3 ⁷ s	...	673 ¹ s 674 ¹ s 683 ¹ s 696 ¹ s
			763.5 s	723.2 s	704 ¹ s	692.5 s 703.2 s 704.2 s	704 ² s	...	690.2 s	693 ¹ s	...	...
				813 ¹ s 818 ⁴ s	...	705.5.5 s 723 h 745.2 s	...	...	...	703.5 n	...	709 ¹ s 719 ¹ s 726 ¹ s
	NO 807 ² h, d	...	...	...	...	760 h 777 h	...	768 ¹ h	762.2 s	765.3 ² n	774 ² s	758 ¹ s 763 ¹ s 772 ¹ s 795 ¹ s 822 ¹ s 852 ¹ s 869 ¹ s 904 ¹ s 937 ¹ s 953 ¹ s 995 ¹ s
		8181.5 s 821 ¹ s	...	843 ² s	847 ² s	879 ² s	807.5 s 837 } h 843 }	...	...	...	...	...
			8401.5 s	...	...	...	...	...	...	...	...	...
				882 h 921.2.2 s	...	9081.5 s 9251.5 s	924 h 919.2.5 s	9093.5 s	899.5 s	917 ¹ s	...	...
	N 9591	...	...	934 h	...	9431.5 s	9411 h 9152.5 s	9212 s	943.5 s	945.3 ⁶ s	927.5 n	...
	N 967 ⁶	...	...	...	...	993.5 s	945 ² s	...	...	9711.5 s	...	...
	N 9754	...	...	...	...	...	...	960 ⁶ s	...	...	...	...
	N 9791	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
D ¹ 1000	...	1000 ² s	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
D ² 1005	...	1005 ² s	...	...	1003 ¹ n	...	...	...	...	...	...	...
Solar.	Air.	Na.	K.	Ca.	Ba.	Sr.	Mn.	Tl.	Ag.	Te.	Sn.	P.

Figura 14¹³³

¹³³ Huggins, "On the Spectra of Some of the Chemical Elements", 152

Cd.	Sb.	Au.	Bi.	Hg.	Co.	As.	Pb.	Zn.	Cr.	Os.	Pd.	Pt.
	396 ³ n											
...	458-5 ¹ n											
...	475 ³ s	...	473 ⁴ s									
502 ⁴ s	487 ¹ s	...	...	...	...	...	480 ¹ s					
...	501-5 n											
...	...	510-5 s										
...	517 ¹ s	...	...	...	...	...	542-5 ⁷ s					
...	...	535-5 s										
...	545 ¹ n	541-5 s	572 ³ s	...	...	...	...	...	541 ¹ s			
...	614 ¹ n	...	581-5 ¹ h	...	...	...	...	577-5 n				
...	620 ¹ n	...	...	...	...	...	...	...
628 ² n	...	...	621 ⁴ s	...	645 ¹ n, d	...	...	...	621-5 n			
...	640 ¹ n	...	...	...	...	...	...	...
650 ² s	...	643-3 s	...	...	...	...	...	690 ⁷ s	640-5 n	641 ¹ s		
...	...	...	...	...	...	672 ¹ n	...	...		
...	...	659-5 s	...	...	...	...	...	...	654 ¹ n			
...	679 ² h	...	...	685 ¹ n	701-5 s	...	...	...			685-5 s	
...	...	...	...	...	...	707 ¹ n	...	...			...	689-5 s
...	...	...	...	697 ¹ n	731-2 s	...	...	...			...
...	...	...	...	...	...	759 ¹ n	...	...			...
...	719 ¹ n	...	...	...	745-5 s	...	...	782 ¹ s	...	741-7 s		
...	720 ² n	727-5 s	...	...	...	...	...	...			762-3 s	
...	730 ² n	734-5 s	...	...	763-2 s	...	...	...			...
...	765 ² n	...	...	...	...	812 ² n	898 ¹ s	...	817 ¹ n	...	837-2 s	
...	...	747 ² s	...	829 ⁷ n	844 h	833 ¹ n	...	855 ⁵ n	...	...	...
...	787 ¹ h	...	837-3 ² n	...	...	856 ³ n	...	...	843 ^{1.5} n	...	...
...	796-5 h	...	884 ⁵ n	863-2 n	865-7 s	...	...	...	...	...	...
...	819 ² n	...	...	...	891-7 s	870 ² n	...	...	856-7 n	...	...
889-5-5 n	837 ⁷ n	...	887-5 s	...	...	...	...	895 ¹ s	...	...	...
918 ¹ n	871 ⁷ n	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
958 ¹ s	889 ² n	...	899 ¹ s	...	...	908-8 ² n	...	906 ⁵ n	...	...	...	913 h
980 ¹ s	921-1 ² n	901-5 s	959 ¹ h	...	921 ¹ s	...	924 ² n	...	...	...	...
...	937-5 ² n	956-5 s	943 ¹ h	...	923-2 s	...	...	...	...	929-7 s	...	
...	981-5 ¹ n	981-7 s	...	...	931-5 s	...	...	...	...	...	...	939 h
...	988-5 ² n	...	...	...	937-5 s	...	...	...	...	...	...	950-5 s
...	...	...	...	...	985 ² s	...	...	...	...	...	965 ¹ h	958-5 s
...	1000-5 ² n	...	...	...	...	...	1000 ¹ s	1001 ² s	...	...	1005 ¹ h	
Cd.	Sb.	Au.	Bi.	Hg.	Co.	As.	Pb.	Zn.	Cr.	Os.	Pd.	Pt.

Figura 15¹³⁴

¹³⁴ Huggins, "On the Spectra of Some of the Chemical Elements", 153.

O Sol, pertencendo à classe das estrelas fixas, apresentava poder de iluminação variável, levando a crer que ainda havia muita investigação experimental a ser realizada. Devemos lembrar que algumas das linhas do espectro solar eram causadas pela absorção da atmosfera terrestre, portanto podia existir algo na atmosfera da Lua e dos planetas que pudesse causar o mesmo efeito. Na Lua foi observado que não há atmosfera, pois Huggins, em 4 de janeiro de 1865, observou o espectro de uma estrela no momento em que a borda escura da Lua passava sobre ela. Se existisse uma atmosfera, o observador veria a luz da estrela por refração, depois a ocultação ocorreria. A conclusão, então, era que a Lua estava isenta de atmosfera.¹³⁵

Huggins participou da publicação do livro *Essays in astronomy*, juntamente com outros pesquisadores, e citou Kirchhoff ao falar sobre a análise dos espectros nos corpos terrestres. De acordo com Huggins:

As pesquisas de Kirchhoff têm chegado às mãos dos astrônomos e são um método de análise importante para o estudo dos corpos celestes. A análise espectral é um novo e distinto ramo da ciência astronômica. Esse novo ramo estende as leis da física terrestre para os fenômenos dos corpos celestiais.¹³⁶

As descobertas de Kirchhoff tiveram muita importância para o estudo dos corpos celestes, pois a gravidade e as leis da física não permitiam a saída da Terra, e por meio da luz era possível obter alguns conhecimentos ao nosso redor no espaço cósmico. Até então as informações sobre os corpos celestes captadas

¹³⁵ Huggins & Miller, "On the Spectra of Some of the Fixed Stars", 415.

¹³⁶ Huggins, "Results of Spectrum Analysis Applied to Heavenly Bodies Celestial Spectroscopy the New Astronomy", 366.

por telescópios se restringiam ao tamanho, à forma e à cor dos corpos. Os estudos de Kirchhoff possibilitavam a interpretação de símbolos e indicações ocultas da luz, fornecendo-nos informações químicas confiáveis.¹³⁷

Huggins reconheceu o valor do trabalho de Kirchhoff e disse que ele ensinou a verdade sobre as linhas. Outros astrônomos também observaram as linhas no espectro de algumas estrelas.¹³⁸

Huggins, ao analisar a composição da atmosfera e a constituição física das estrelas, acoplou a seu telescópio um espectroscópio de dois prismas e por um ajuste exato ele foi capaz de observar a imagem da estrela. Huggins falou sobre essa análise:

É muito difícil realizar essas observações, pois a luz de uma estrela enviada de um ponto não possui magnitude sensível.[...] A dificuldade da luz se manter fixa sobre a fenda é devido ao movimento da Terra. [...] Ainda existe o fato de a luz captada ser fraca.¹³⁹

Para obter um conhecimento da composição química das estrelas, ou quais elementos estão presentes nelas, era necessário usar delicados arranjos, pelos quais não só a luz da estrela passaria pelo prisma e seria recebida pela retina, como também a luminosidade emitida por outras substâncias indicaria a presença ou ausência da atmosfera estelar.¹⁴⁰

Huggins e Miller estudaram o espectro das estrelas. Huggins cita:

Eu tenho me engajado por algum tempo com o professor Miller na observação do espectro das estrelas fixas. Para um propósito de determinar com precisão as linhas estelares e essa possível

¹³⁷ Huggins, "Results of Spectrum Analysis Applied to Heavenly Bodies Celestial Spectroscopy the New Astronomy", 366.

¹³⁸ Ibid, 367.

¹³⁹ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 325.

¹⁴⁰ Huggins & Miller, "On the Spectra of Some of the Fixed Stars", 415.

coincidência com as linhas brilhantes dos elementos terrestres, eu construí um aparato em que o espectro de uma estrela pode ser observado e comparado diretamente com qualquer espectro desejado. Para fazer essa comparação, nós não encontramos mapas do espectro de elementos químicos que estivessem disponíveis. Os detalhados e mais precisos mapas e tabelas de Kirchhoff foram confinados a uma porção do espectro e somente para alguns corpos elementares, e no mapa de ambos, na primeira e na segunda parte dessas investigações, os elementos que são descritos não são todos dados com igual plenitude em diferentes partes do espectro. Mas esses mapas foram menos usados para esse propósito, porque as linhas brilhantes dos metais são previstas relativamente abaixo das linhas escuras do espectro solar. Há uma incerteza em determinar essas posições à noite, e também em circunstâncias em que o espectro solar não pode ser convenientemente comparado. Além disso, em consequência das diferenças do poder de dispersão dos prismas e da incerteza de estar sendo colocadas num mesmo ângulo para os raios incidentes, tabelas de números obtidas com um único instrumento não são suficientes para determinar linhas dessas posições com qualquer outro instrumento.¹⁴¹

Huggins descreveu o espectro de duas estrelas, Aldebaran e Betelgeuse, esta última conhecida como α da constelação de Órion. O desenho (figura 16) demonstra as linhas espectrais das estrelas e foi feito em um plano similar com o Diagrama de Kirchhoff:

¹⁴¹ Huggins, "On the Spectra of Some of the Chemical Elements", 139.

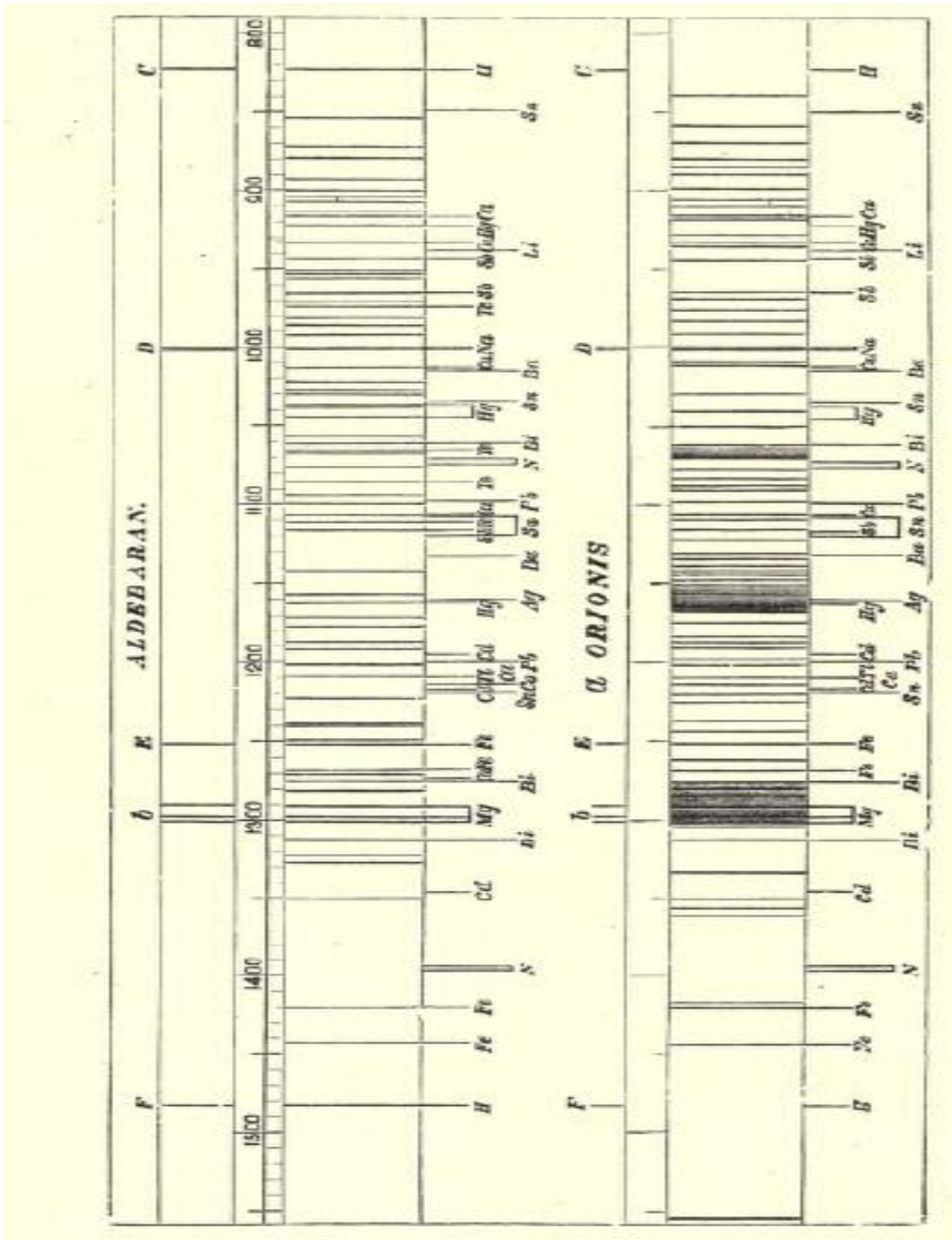


Figura 16¹⁴²

¹⁴² Roscoe, *Spectrum Analysis*, 328.

Quando comparado o espectro das estrelas fixas com o do Sol, é possível concluir que são espectros parecidos, pois as estrelas são sóis de diferentes sistemas.¹⁴³ Em algumas estrelas analisadas foram encontradas linhas que representavam o sódio e o magnésio no espectro. As observações também confirmaram a presença de hidrogênio em Aldebaran, mas não foi encontrado em Betelgeuse. As linhas que indicam a presença de cálcio também foram encontradas em ambas as estrelas. Foram localizadas nessas duas estrelas mais de setenta linhas, e Huggins e Miller encontraram em Aldebaran: hidrogênio, sódio, magnésio, cálcio, ferro, bismuto, telúrio, antimônio e mercúrio.¹⁴⁴

De acordo com Huggins, novos elementos podem ser encontrados em sistemas distantes. Após a análise dos espectros de algumas estrelas, encontramos as linhas que indicavam alguns elementos. Em β Pegasi, foram encontrados sódio, magnésio e talvez bário; em Sirius, sódio, magnésio, ferro e hidrogênio; em α Lyrae (Vega), sódio, magnésio e ferro; em Pollux, sódio, magnésio e ferro e em outras sessenta estrelas foram encontrados elementos comuns no Sol e na Terra.¹⁴⁵

Também foi possível entender as condições físicas das estrelas fixas. Elas possuíam um núcleo branco e quente, o que promovia um espectro contínuo, e ao redor uma atmosfera incandescente, contendo vapores de alguns metais responsáveis pela absorção de parte da luz que elas emitiam.¹⁴⁶

Outra questão era a diferença no brilho das estrelas, pois uma apresenta um brilho branco, enquanto outras um brilho amarelo e outras um brilho azul. Quando o espectro de luz branca foi analisado, como o da estrela Sirius, Huggins

¹⁴³ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 329.

¹⁴⁴ Huggins & Miller, "On the Spectra of Some of the Fixed Stars", 424.

¹⁴⁵ Huggins, "Results of Spectrum Analysis Applied to Heavenly Bodies Celestial Spectroscopy the New Astronomy", 376.

¹⁴⁶ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 330.

observou um espectro contínuo com linhas escuras intercaladas de uma maneira que, segundo ele, era bem bonita, através do comprimento do espectro, porém quando toda a luz entrava no olho de uma vez, era produzido sobre a retina o efeito de uma luz branca. Dentre as estrelas alaranjadas conhecemos a α Herculis, uma estrela dupla. Nesse caso a maior quantidade de linhas aparecia no verde, azul e vermelho intenso. A luz era praticamente livre de sombras na região amarela ou laranja, por isso as luzes das porções azul, verde e vermelho ficavam enfraquecidas e a estrela brilhava com a luminosidade amarela. A análise espectral podia auxiliar na compreensão das cores emitidas pelas estrelas.¹⁴⁷

Padre Secchi, observando centenas de estrelas no céu de Roma, separou-as em quatro grupos de acordo com seus espectros. O grupo 1 continha estrelas brancas, como Sirius, α Lyrae e Vega; o grupo 2 continha estrelas amarelas, como a Pollux, Capella, γ Aquilae e nosso Sol; o grupo 3 continha as estrelas vermelhas e laranjas como a α Orionis, α Herculis e β Pegasi; e o grupo 4 era feito de pequenas estrelas vermelhas, nas quais o espectro era distinguido por sucessões de três zonas brilhantes, aumentando a intensidade em direção ao violeta. Das 316 estrelas examinadas, Secchi percebeu que 164 pertenciam ao primeiro tipo, 140 ao segundo e as demais ao terceiro e quarto grupos.¹⁴⁸

O espectro de outras estrelas foi investigado por Huggins. Sirius foi fotografada e seu brilho aparente era milhares de vezes menor que o do Sol, mas seu tamanho era não menos que sessenta vezes o de nosso Sol e sua distância de nós é de aproximadamente 209 trilhões de quilômetros.¹⁴⁹

¹⁴⁷ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 331.

¹⁴⁸ *Ibid.*, 333.

¹⁴⁹ *Ibid.*, 335.

Ele ainda observou em Sirius um deslocamento das raias para o vermelho, observando um afastamento da estrela, de acordo com a Lei de Doppler.¹⁵⁰

Os espectroscópios passaram a ser instrumentos importantes na observação e análise de fenômenos como os eclipses. Major James Francis Tennant (1829–1915) observou que a coroa somente dava um espectro solar contínuo e que a luz das proeminências apresentam linhas brilhantes de refrangibilidade definida, demonstrando que são constituídas de materiais gasosos de temperaturas muito altas.¹⁵¹

As linhas espectrais não existiam somente na porção visível, mas também ocorriam na porção que contém os raios quentes e invisíveis, os raios quimicamente ativos. Não era possível demonstrar as linhas na porção ultravermelho do espectro, mas seria possível na região ultravioleta. Com ajuda da pesquisa de George Gabriel Stokes sobre fluorescência, essas linhas tornaram-se perfeitamente conhecidas. Um diagrama, representado pela figura 17, mostra o efeito produzido em um filme sensibilizado, exposto à ação de raios ultravioletas, passando pelos prismas. Os espaços sombreados no papel indicam a posição em que a intensidade dos raios é pequena. Esses espaços são as linhas de Fraunhofer emitidas pela luz do Sol, na região ultravioleta. É possível ver essas linhas esticadas num longo caminho, fora da porção visível do espectro, à qual o olho é geralmente sensível, terminando em algum lugar próximo da linha H.¹⁵²

¹⁵⁰ Verdet, *Uma história da astronomia*, 192.

¹⁵¹ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 278.

¹⁵² *Ibid.*, 229.

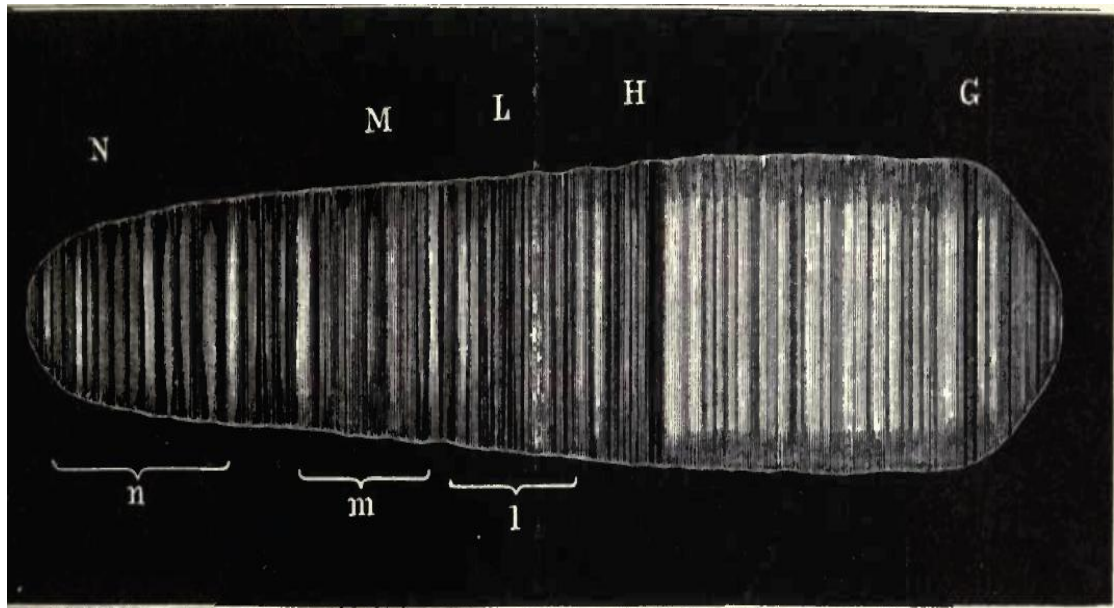


Figura 17¹⁵³

Huggins examinou com o espectroscópio uma classe de corpos luminosos chamados nebulosas, e a primeira a ser examinada foi a da constelação de Draco. As nebulosas mostravam um sistema planetário em avançado estágio de evolução. A massa gasosa central foi condensada a um tamanho moderado comparando com as dimensões que deve ter possuído antes de qualquer planeta ser formado.¹⁵⁴ A luz emitida por uma nebulosa é muito pequena, o que tornou a análise espectral desses corpos muito difícil. Ele percebeu que o espectro da nebulosa era da mesma natureza que das estrelas e encontrou três linhas brilhantes isoladas, como mostra a figura 18:

¹⁵³ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 229.

¹⁵⁴ Huggins, "Sketch of William Huggins", 263.

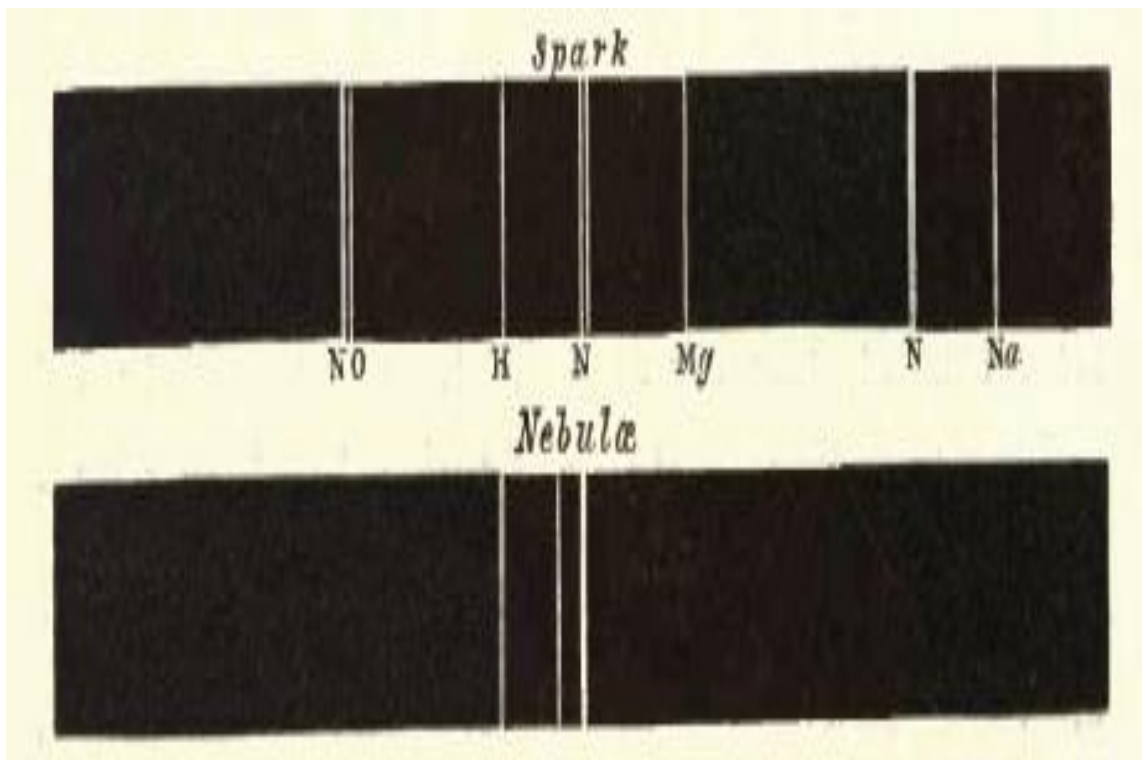


Figura 18¹⁵⁵

Comparando com o espectro de uma faísca elétrica, de acordo com a figura 18, era possível observar a presença de nitrogênio e hidrogênio na nebulosa. Também foi observado um espectro contínuo, o que tornava possível uma conclusão de que a nebulosa não apresentava um núcleo quente e branco envolvido em uma atmosfera, na qual a luz era absorvida, dando as linhas escuras.¹⁵⁶ Concluiu-se também que outras linhas demonstrando a presença de outras substâncias não apareciam, pois a intensidade da luz era muito fraca.¹⁵⁷

O próximo corpo celeste observado seria o cometa. Entre 1866 e 1867 um pequeno cometa foi examinado e observado um espectro fraco e contínuo, no qual eram vistas linhas brilhantes. Também foi observada uma massa de gás incandescente, sendo que uma porção da luz do cometa era própria, e outra,

¹⁵⁵ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 336.

¹⁵⁶ *Ibid.*, 337.

¹⁵⁷ *Ibid.*, 340.

reflexo do Sol. Comparados os espectros dos cometas com outros já conhecidos, como as nebulosas, as faíscas elétricas e as linhas solares, foram observados traços não compatíveis com aqueles já conhecidos, como mostra a figura 19. Posteriormente outro cometa foi analisado mostrando traços de carbono em sua composição.

As observações feitas por Huggins sobre os cometas mostravam que havia diferentes tipos deles e que alguns poderiam apresentar diferentes espectros em diferentes ocasiões, pois seu brilho podia ser devido à reflexão solar ou à sua própria luz.¹⁵⁸

¹⁵⁸ Huggins, "Sketch of William Huggins", 263.

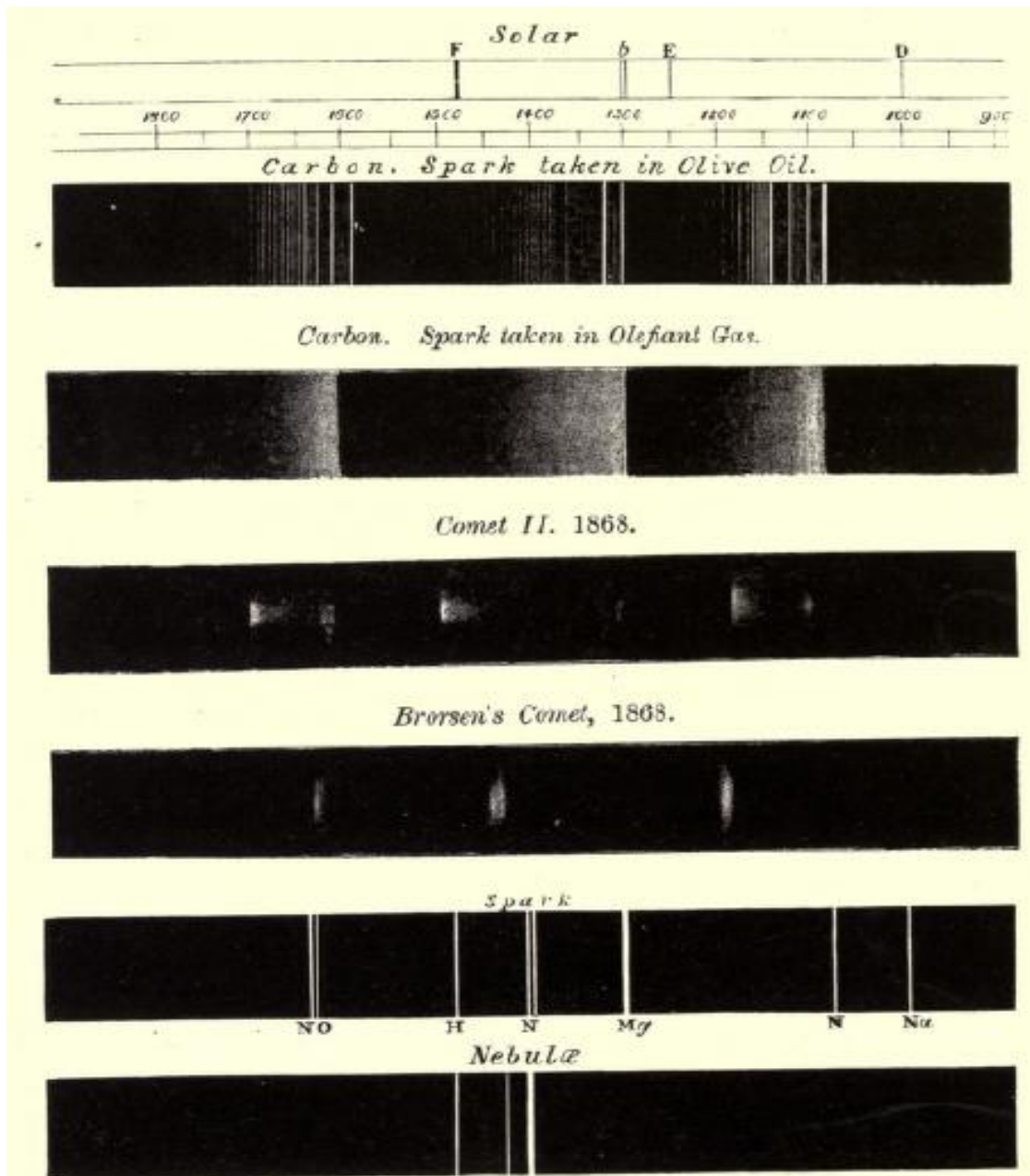


Figura 19¹⁵⁹

Huggins conclui que o novo conhecimento adquirido através da análise espectral podia ser resumido em alguns pontos:

1. Toda estrela brilhante tem uma estrutura parecida com a do Sol;

¹⁵⁹ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 344.

2. As estrelas contêm materiais que apresentam elementos comuns no Sol e na Terra;
3. As cores das estrelas têm sua origem na constituição química da atmosfera ao seu redor;
4. As mudanças no brilho de algumas estrelas variáveis alteram de acordo com as linhas de absorção do seu espectro;
5. O fenômeno da coroa nas estrelas aparece para demonstrar que grandes mudanças físicas estão em operação;
6. No céu existem nebulosas verdadeiras, constituídas de gases luminosos;
7. O material dos cometas é mais similar aos gases das nebulosas;
8. O ponto brilhoso dos aglomerados de estrelas pode não ser, em todos os casos, estrelas de mesma ordem.¹⁶⁰

Huggins e Miller foram respectivamente homenageados pela *Royal Society* em 1865, e pela *Royal Astronomical Society* em 1867, por suas pesquisas em astronomia por meio de um espectroscópio. Huggins ainda definiu que “o progresso da espectroscopia astronômica nasceu em Heidelberg em 1859”, fazendo uma menção aos trabalhos realizados por Bunsen e Kirchhoff.¹⁶¹

Publicado na *Edinburgh Review* em outubro de 1862, um artigo de Sydney Smith relata outras observações sobre os trabalhos de Bunsen e Kirchhoff:

Como esses resultados podem ajudar na descoberta do elixir da vida eterna e da pedra filosofal? Como dois filósofos alemães trabalharam discretamente em seu laboratório em Heidelberg, obtendo uma visão inconcebível do processo de criação? São conclusões a que eles têm chegado com observações e experimentos e somente verdades baseadas no raciocínio das ciências físicas, ou eles não saborearam um pouco do misticismo de seus famosos amigos alemães. Os resultados são claros através de experimentos de laboratório e observações e podemos expressar nossa satisfação com as mudanças ocorridas

¹⁶⁰ Roscoe, *Spectrum Analysis*, 390.

¹⁶¹ Huggins, “Sketch of William Huggins”, 263.

nos últimos anos em relação ao poder de inteligência da indústria alemã. Se a literatura alemã tem sido comparativamente improdutiva, os trabalhos na ciência alemã são imensos e a qualidade desses trabalhos, excelente.¹⁶²

Os trabalhos e as conclusões sobre análise espectral tiveram muita importância para aquele momento e para os anos posteriores. A “Indústria Alemã”, como relata Smith, parecia ter um destaque especial no ramo da ciência. Não somente Bunsen e Kirchhoff tiveram essa admiração e respeito, mas muitos outros tiveram grande importância para o desenvolvimento da espectroscopia.

Mesmo com uma vasta quantidade de trabalhos, experimentos, demonstrações, teorias, os pesquisadores em questão às vezes são citados de uma maneira simplista. Na publicação de James Riddick Partington (1886 – 1965) são citadas as descobertas do cézio e do rubídio, e alguns instrumentos como a bateria e o queimador, ambos de Bunsen, além de citar brevemente sobre o ano do aprofundamento sobre a análise espectral¹⁶³. Seria interessante uma descrição das contribuições dos pesquisadores naquele período.

Num artigo publicado na *Popular Science* em 1934, por Gaylord Johnson, com o título: “Thrilling Experiments You Can Perform With a Homenade Spectroscope”, o autor orienta o leitor sobre o modo de usar o espectroscópio, fala sobre a possibilidade de identificar diversos tipos de sais através das linhas, mostra como usar o prisma independentemente do aparelho, indica a possibilidade de interpretar o espectro do Sol e de estrelas distantes, mas falha numa questão: Johnson não cita Bunsen e Kirchhoff, que aperfeiçoaram a espectroscopia, desenvolveram o método, identificaram as linhas e abriram

¹⁶² Smith, “Researches on the Solar Spectrum, and the Spectra of the chemical Elements”, 150.

¹⁶³ Partington, *A short history of chemistry*, 236.

caminhos para o estudo da química estelar. O autor somente faz menção aos testes realizados por Newton na observação de um belo espectro colorido e nas linhas identificadas por Fraunhofer. O único momento em que aparece o nome de Bunsen é para falar da importância de seu queimador para a eficiência dos resultados.¹⁶⁴

A análise espectral realizou o que muitos consideravam impossível, derrubando teorias que afirmavam que nunca seria possível estudar a composição química dos corpos terrestres e celestes. Num artigo publicado pela *American Philosophical Society*, Paul W. Merrill relata que Auguste Comte (1798-1857) achava impossível determinar a composição química de corpos celestes.¹⁶⁵ Comte morreu alguns anos antes dos experimentos de Bunsen e Kirchhoff serem concretizados. Ele foi poupado de ver uma total demolição de sua convicção.¹⁶⁶ A astrofísica não só o desmentiu, como demonstrou que estabelecer limites para o conhecimento é uma posição insustentável.

¹⁶⁴ Johnson, "Thrilling Experiments You Can Perform With a Homemade Spectroscope", 47.

¹⁶⁵ Merrill, "Side Lights on cosmic chemistry", 357.

¹⁶⁶ Bhattacharyya, "A short History", 27.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Procuramos nesta pesquisa compreender o conhecimento como algo em construção, analisando todas as etapas de formulação de um método responsável por mostrar um caminho para melhor compreender os fenômenos que nos cercam.

Não podemos compreender a ciência como algo pronto ou como um conceito de que o conhecimento é simplesmente uma somatória de conhecimentos que se acumulam ao longo do tempo.

Também foi extremamente importante analisar os fatos históricos de uma maneira não anacrônica, percebendo a importância do estudo em questão para a época e quais as contribuições para as pesquisas posteriores.

Analisando as obras “Photochemical Researches”, publicada pela *Proceedings of the Royal Society of London* e escrita por Bunsen e Roscoe, e *Spectrum Analysis*, escrita por Roscoe, percebemos uma nítida relação dos estudos em fotoquímica e espectroscopia. Não somente pelo fato de ambos estarem relacionados com a luz, mas também porque a fotoquímica necessitava de uma pesquisa mais direcionada. Surgia aí a forma de espectroscopia desenvolvida por Bunsen e Kirchhoff, utilizando um método, que através da decomposição da luz, poderia determinar em que porção luminosa encontraríamos raios de luz suficientemente capazes de alterar a composição química da matéria.

Percebemos que este foi exatamente o caminho, em que, ao invés de a espectroscopia somente auxiliar a fotoquímica, ela se desenvolveu trazendo inúmeros resultados para a determinação da composição química dos materiais.

Analisando a *Spectrum Analysis*, pudemos verificar que Roscoe fez uma síntese de diversos assuntos ligados à espectroscopia, utilizando como fontes as obras de vários pesquisadores. O autor não se mostrou imparcial nas análises, promovendo durante toda sua apresentação pesquisadores ingleses.

Ao analisar o espectroscópio, constatamos os confrontos entre os diversos métodos de uso. Observamos os arranjos (espectroscópio acoplado em telescópios ou microscópios) que eram realizados para que pudessem ocorrer, sem dificuldades, observações de espectros de corpos com baixa emissão de luz. Também foi possível perceber algumas falhas que ocorreram nas construções, nos conceitos empregados e ainda na interpretação de resultados obtidos com o instrumento. As linhas que surgiam no espectro, em alguns momentos, foram encaradas como falhas no aparelho. O surgimento de linhas mais ou menos brilhantes, ou linhas que coincidiam, deixavam os pesquisadores preocupados com a veracidade dos resultados.

Observando o grande número de estudiosos que desenvolveram estudos a partir da espectroscopia proposta por Bunsen e Kirchhof, tais como a análise da composição química de materiais terrestres, a descoberta de novos elementos químicos, a análise do espectro solar e a investigação da composição química de corpos distantes, como os planetas e as estrelas, concluímos que as pesquisas desenvolvidas pelos pesquisadores em questão proporcionaram de uma maneira muito significativa o crescimento científico na Europa e em especial na Alemanha.

A análise espectral auxiliou no desenvolvimento de pesquisas realizadas por Herchel, Huggins, Miller, Fox-Talbot, Swan, Stokes, Angstron, entre outros, e trouxe um novo método de interpretação da luz, não somente para a análise e determinação de materiais terrestres, como também para as descobertas sobre a

estrutura química e física do Sol, de outras estrelas, dos planetas, dos cometas e das nebulosas.

No espectro do Sol, foi possível observar as linhas que indicavam sua composição química, concluindo, a princípio, que o Sol era composto por hidrogênio, sódio e ferro. As observações das linhas mostraram posteriormente que no Sol eram encontrados diversos metais como o cálcio, o magnésio, o cromo, o níquel, o cobalto, o bário, o cobre e o zinco. Ainda foram encontradas linhas no espectro solar que não representavam nenhum elemento conhecido na Terra. A análise espectral auxiliou na descoberta do hélio, um gás que depois foi localizado entre os materiais terrestres.

Através da análise espectral, também foi possível observar as manchas solares e outras variações na atmosfera do Sol no momento dos eclipses. Foi possível ainda mostrar, além de suas composições químicas semelhantes com sua região central, as características físicas que indicavam a presença de gases incandescentes. Para os pesquisadores foi interessante concluir que elementos químicos presentes na Terra também são encontrados em corpos a milhões de quilômetros distantes de nós.

Analisando as pesquisas de Bunsen e Kirchhoff, percebemos a grande importância para os estudos astronômicos. Além do Sol, outros corpos que emitiam ou refletiam luz, tiveram seus espectros observados e proporcionaram aos astrônomos novas maneiras de enxergar o universo.

Os planetas, que não apresentam luz própria, mostravam uma reflexão da luz solar, portanto não seria possível determinar sua composição química, mas a espectroscopia auxiliou na compreensão de alguns aspectos físicos, como a presença de atmosfera.

A espectroscopia também mostrou evidências de um deslocamento das estrelas. Nas observações realizadas na estrela Sirius, o deslocamento das raias, observadas em seu espectro, mostravam um afastamento da estrela, comprovando os estudos ligados à Lei de Doppler.

A observação das estrelas levou os pesquisadores a concluírem que seus espectros e, por consequência, suas composições químicas, eram semelhantes aos do Sol, pois pertenciam a uma mesma classe de corpos celestes.

Os cometas mostraram dois tipos de espectro. Em algumas observações havia uma semelhança com o espectro solar, pelo fato desse corpo celeste se aproximar do Sol e refletir sua luz. Em outros casos o espectro se tornava mais característico, devido à presença de sua massa incandescente, mostrando em alguns casos traços de carbono.

As pesquisas realizadas por Bunsen e Kirchhoff sobre a análise espectral contribuíram significativamente com a astronomia, pois mostraram aspectos até então desconhecidos sobre a composição química e os aspectos físicos dos corpos celestes. A espectroscopia tornou-se um método que ajudou a desvendar segredos do universo.

Na maioria dos estudos aqui analisados, pesquisadores fazem referência a Bunsen e Kirchhoff como pessoas importantes para a espectroscopia. Sem eles muitos métodos de investigação da composição dos corpos terrestres e celestes não seriam possíveis.

BIBLIOGRAFIA

Angstron, A. J., *Recherches sur le Spectre Solaire*. Upsal: W. Schultz, Imprimeur de L'universite, 1868

Anônimo [Council, American Academy of Arts and Sciences]. "Gustav Robert Kirchhoff." *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences* 23, no. 2 (maio, 1887 - maio, 1888): 370-375.

Ball, Robert Stawell. *Elements of astronomy*. London: Longmans, 1889

Bhattacharyya, F.C. "A short History." *Resonance*. volume(Maio 1998): 24-29

Bunsen, Robert W., Roscoe, Henry E. "Photochemical Researches: Measurement of the Chemical Action of Light." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Royal Society of London* 147, parte I (1857): 355-380, parte I

_____ "Photochemical Researches: Phenomena of Photo-Chemical Induction." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Royal Society of London* 147 (1857): 381-402, parte II

_____ "Photochemical Researches: Optical and Chemical Extinction of the Chemical Rays." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Royal Society of London* 147 (1857): 601-620, parte III

_____ "Photochemical Researches: Part IV." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Royal Society of London* 149 (1859): 879-926, parte IV

_____ "Photochemical Researches: On the Direct Measurement of the Chemical Action of Sunlight." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Royal Society of London* 153 (1863): 139-160, parte V

Bunsen, Robert W., Kirchhoff, Gustav R. "Chemical analysis of substances by observations on their spectra." *The Edinburgh Review or Critical Journal* volume CXVI (Julho-Outubro, 1862), 149-160

Bunsen, Robert W., "Inversion of the Absorption bands in the spectrum of didymium". *Philosophical Magazine and Journal of Science* volume XXVIII (Julho-dezembro, 1864), 246-247

Cohen, I. Bernard, Westfall Richard S. Newton: Textos, antecedentes, comentários. Rio de Janeiro: Eduerj, Contraponto, 2002

Cowley, Charles R. *An introduction to cosmochemistry*. New York: Cambridge University Press, 1995.

Cyril, Ponnampertuma. *Chemical evolution of the giants planets*. New York: Academic Press, 1976.

Dingle, Herbert. "A hundred years of spectroscopy. The fifty-third Robert Boyle lecture" *The British Journal for the History of Science* 1, nº3 (Jun., 1963): 199-216

Fiebig. M. O., "On the Influence of Heat on Phosphorescence". *Philosophical Magazine and Journal of Science*, volume XXIII (Janeiro – junho, 1862), 335

Figueiras. Carlos A.L. "A espectroscopia e a química: Da descoberta de novos elemento ao limiar da teoria quântica." *Química nova escola* 3 (Maio 1996): 22-25

Forbes, George. *History of Astronomy*, Glasgow: 1909

Friça, Amâncio C.S, Pino, Elisabete Dal, Junior, Laerte Sodré, Jatenco-Pereira, Vera. *Astronomia: Uma visão geral*. São Paulo: Edusp, 2003

Helmholtz, Robert V., *Popular Science Monthly*, citado em Obituário de Kirchhoff, anônimo, *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, 370-375

Hudson, John. *The History of Chemistry*. Cambridge: Anglia Polytechnic University, 1992

Huggins, William. "Results of Spectrum Analysis Applied to Heavenly Bodies Celestial Spectroscopy the New Astronomy" In *Essays in astronomy*, org. Ball, Harkness, Herschel, Huggins, Laplace, Mitchel, Proctor, Schiaparelli, e outros 365-472. New York: D. Appleton e Company, 1900

_____ "Sketch of William Huggins", *The Popular Science Monthly* (Junho, 1892), 260-266

_____ "On the Spectra of Some of the Nebulae." A Supplement to the Paper Huggins, William. "On the Spectra of Some of the Chemical Elements" *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 154 (1864), pp. 139-160

Huggins, W. Miller, W. A. "On the Spectra of Some of the Fixed Stars" *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 154 (1864), pp. 413-435

_____ "On the Spectra of Some of the Fixed Stars". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 154 (1864), pp. 437-444

Humbert, Pierre. *Histoire dès découvertes astronomiques*. França: Editions de La Revue des Jeunes, 1948

James, Frank A. J. L. "The Stablishment of spectro-chemical analisys as a pratical method of quantitative analisys." *Ambix*, 30 (1983): 30-53

_____ "Science as a cultural ornament : Bunsen, Kirchhoff and Helmholtz in Mid-Nineteenth-Cebtury Baden." *Ambix* 42, Part 1, (Março 1995): 1-9

Kirchhoff, Gustav R. *Researches on the Solar Spectrum and the Spectra of the Chemical Elements*. London: Macmillan and Co., Cambridge, 1862

_____ “Contributions Towards the History of Analysis and the Analysis of the Solar Atmosphere” *Philosophical Magazine and Journal of Science*, volume xxv (Janeiro –junho, 1863), 250-267

McLennan, John Ferguson. *Memoir of Thomas Drummond*, Edinburgh: Edmonston and Douglas, 1867

Merrill, Paul W. “Side Lights on cosmic chemistry.” *Proceedings American Philosophical Society* 97, nº4 (Abril 1953): 356-358

Newton, Isaac. *Óptica*. São Paulo: Edusp, 2002

Nogueras, Don Rafael Luna y. *Técnica espectroscópica. Memória*. Madrid: Universidade Complutense, 1902.

Partington, J.R. *A short history of chemistry*. New York: Dover publications, 1989

Penzhorn, Ralf-Dieter. *Fotoquímica de gases*. Washington: O. E. A., 1972.

Proctor, Richard Antony. *Old and new astronomy*. London: Longmans, Green. 1888.

Roscoe, Henry E. “Bunsen Memorial Lecture.” *Journal of the Chemical Society* 77, pt 1 (1900) : 513-554

_____ *Spectrum Analysis*. London: Macmillan and Co., 1873.

_____ *The Life e Experiences of Sir Henry Enfield Roscoe*. London: Macmillan and Co., Limited. New York: The Macmillian Company, 1906

Roscoe & Clifton, *On the Effect of Increased Temperature Upon the Nature of the Light by Vapour of Certain Metals or Metallic Compounds* citado em Roscoe, Henry E. *Spectrum Analysis*. London: Macmillan and Co., 1873.

Rosseland, Svein. *Theoretical astrophysics : atomic theory and the analysis of stellar atmospheres and envelopes*. Oxford :The Clarendon press, 1936.

Russel, Colin A. "Bunsen without his burner." *People in physics*. 34 (Setembro 1999): 321-326

Smith, Sydney. "Researches on the Solar Spectrum, and the Spectra of the chemical Elements" *The Edinburgh Review or Critical Journal* 116 (Outubro de 1862): 149-160

Stokes, G. G., "On the Reduction and Oxidation of the Colouring Matter of the Blood", *Proceedings of the Royal Society of London* vol xxviii (Julho- dezembro, 186), 355-364

Stwertka, Albert. *A Guide to the Elements*. New York: Oxford University Press, 2002

The Free Dictionary - <http://www.thefreedictionary.com/spirit+lamp> (acessado em 28/09/2009)

Thiel, Rudolf. *E a luz se fez: o romance da astronomia*. São Paulo. Melhoramentos. 19-? Tradução Marina Guaspari

Turnbull, H. W., J.F. Scott, A. Rupert Hall, Laura Tilling (orgs.), *The Correspondence of Isaac Newton* (Cambridge: Cambridge University Press, 1959-1977), v.1, pp 92-102, citado em I. Bernard Cohen e Richard S. Westfall. *Newton: textos, antecedentes, comentários* (Rio de Janeiro, Eduerj, Contraponto, 2002), 214.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
<http://astro.if.ufrgs.br/rad/espec/espec.htm> (acessado em 11/07/2008)

Universidade Federal Fluminense. Laboratório de plasma e espectroscopia atômica. <http://www.if.uff.br/plasma/espectroscopia.htm> (acessado em 11/07/2008)

Verdet, Jean-Pierre. *Uma história da astronomia*. Rio de Janeiro. Jorge Zahar, 1991.

Wilder Burt G., "Sketch of Professor Stokes", *The Popular Science Monthly* (October, 1875), 742-745

Young. C. A., "Helium, its identification and properties", *Appletons Popular Science Monthly volume* (Janeiro, 1896), 339-343