

O primeiro espectro das protuberâncias solares

M. N. BERBERAN E SANTOS *

ANTECEDENTES E PREPARATIVOS

O eclipse total do Sol de 18 de Agosto foi o grande fenómeno celeste de 1868 (ver Destaque I). Era esperado com impaciência por astrónomos e físicos, pois seria a oportunidade de aplicar pela primeira vez a recente técnica de Análise Espectral ao Sol eclipsado. Esta técnica, desenvolvida em grande medida por Bunsen e Kirchhoff, mostrara já o seu valor ao levar à descoberta de quatro novos elementos químicos (Quadro I), bem como à identificação de ferro, cálcio, magnésio, sódio, níquel e crómio na atmosfera solar, o que despertara um interesse generalizado.

Os estudos físicos propriamente ditos tinham duas finalidades principais: em primeiro lugar, proceder ao estudo das protuberâncias (ver Destaque II), para determinar a sua dinâmica, estado físico e composição química - tentar-se-ia pela primeira vez obter o seu espectro de emissão; em segundo lugar, pretendia-se obter o espectro da camada gasosa acima da fotosfera. Se a teoria de Kirchhoff (sol constituido por um globo sólido incandescente rodeado por uma atmosfera gasosa mais fria) fosse correcta, essa camada fria, que segundo este produzia as riscas de Fraunhofer, apresentaria por si só um espectro semelhante mas invertido, isto é, em que as riscas de absorção se tornavam riscas de emissão. Este espectro de emissão deveria ser observável imediatamente antes e imediatamente depois da totalidade, quando a Lua deixasse ver apenas uma fracção da atmosfera acima do bordo solar.

O rigor dos cálculos astronómicos de então permitia prever com bastante exactidão os locais onde o eclipse seria total (faixa de totalidade), bem como a hora e a duração do mesmo para cada local. Tais informações constavam em particular dos Almanques Náuticos e Anuários de Observatórios, publicados com antecedências superiores a um ano. Os pontos mais acessíveis da faixa de totalidade e onde o eclipse teria a maior duração (de 5 minutos e 10 segundos a 6 minutos e 47 segundos) situavam-se

na Índia, na Península de Malaca e no sul do Camboja [1-3].

Como em 18 de Agosto se estaria em plena monção de sudoeste, as zonas costeiras à sua mercê ficavam desde logo postas de parte como possíveis pontos de observação. Era o caso de Goa, onde o eclipse foi afinal observado, num dia com nuvens mas sem uma gota de chuva [4] (Figura 1).

Eclipse do sol total e visível em Goa. No dia 18 do corrente haverá eclipse do sol, e será total e visível em Goa. O *Almanach do céu de Goa* fallando deste eclipse, diz que começará ás 7 $\frac{1}{2}$ horas da manhã, passará a ser central ás 8 horas e 24 minutos, será central ao meio dia ás 10 horas e 8 minutos, deixará de ser central ás 11 horas e 49 minutos, e acabará aos 44 minutos depois do meio dia. Uma carta de Bombaim diz-nos, que o paquete ahí chegado no dia 30 de julho, trouxe os professores e astrónomos allemães Spoer, Tietzen, Englemann, e o professor que dizem ser inguez mr. C. Koppe, os quaes vem expressamente da Europa estudar os phenomenos do proximo eclipse.

Foram várias as nações europeias que organizaram expedições científicas para o estudo do eclipse. Os astrónomos vienenses Weiss e Von Oppolzer',

Eclipse total de Sol - (Observação feita em Calangute). Como estava anunciado para o dia 18, verificou-se o eclipse total do sol. Era geral a expectação e a curiosidade para a observação deste phenomeno: desde o sábio até o burguez e o pescador esperavam-no com ansiedade à hora marcada. No domingo proximo precedente, em varias freguesias, os parochos tinham tido a curiosidade de annunciar ao povo, na cadeia da estação, o eclipse, descrevendo todos os phenomenos esperados. Nasceu pois o dia 18, soprava rijo o vento e o horizonte estava toldado de nuvens; mas, felizmente, às 7 horas da manhã, algumas restias do sol cobadas por entre as nuvens vinham doirar a terra; o sol estava brilhante, e, ainda que, nuvens vaguelando de um a outro lado vinham interceptar, de vez em quando, o disco do sol, toda via era possível alguma observação. Começou o eclipse às 7h.30 m. A.M. Foi total às 8h. 23 m. A.M. Deixou de ser total às 8h.28 m. A.M. Acabou o eclipse às 9h.48 m. A.M. Foi pois total o eclipse 5 minutos - Neste intervalo o disco do sol estava inteiramente eclipsado, apresentando apenas allumiado o rebordo sueste no tamanho da estrella matutina; então houve escuridão similhante ao lusco-fusco muito denso; e viram-se tres estrelas a olho nu. Durante este tempo algumas mulheres e crianças foram tomadas de pânico e gritavam fortemente mas, em geral, todos gostaram de ver o phenomeno e queriam pelo meos que durasse umas 4 horas.....

Figura 1 - Notícias publicadas na imprensa goesa, respectivamente em "O Ultramar" (Margão) de 13/8/868 e em "Índia Portuguesa" (Orilim) de 20/8/868.

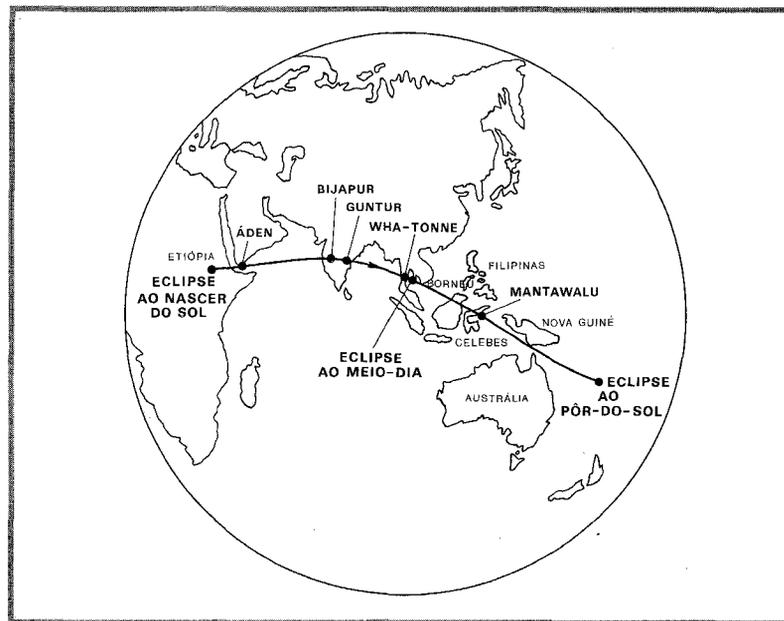
I. Eclipse total do Sol de 18 de Agosto de 1868

O eclipse de 18 de Agosto de 1868 foi considerado o eclipse do século, pela sua duração excepcionalmente longa, que atingiu um máximo de 6 minutos e 47 segundos (sendo o limite teórico de 7 minutos e 40 segundos). Um eclipse do Sol é tanto mais longo quanto maior for o diâmetro aparente (isto é, visto da Terra) da Lua em relação ao diâmetro aparente do Sol. Este último é mínimo no início do Verão, quando Terra e Sol estão o mais afastados possível. Em 18 de Agosto, o diâmetro aparente do Sol estava pois próximo do mínimo, nesse ano atingido a 1 de Julho. Por outro lado, e mais importante, a Lua atingira nesse mesmo dia o perigeu, isto é, a menor distância à Terra, pelo que o seu diâmetro aparente era quase o máximo. Além disso, as regiões onde se daria o eclipse encontravam-se nos trópicos; outro factor favorável a uma duração elevada. A região varrida pelo cone de sombra, dita faixa de totalidade, encontra-se indicada na

Figura 2, redenhada do *Nautical Almanac* britânico para 1868. Tal faixa, com uma largura variável com a longitude, mas da ordem dos 250 Km, corresponde à região varrida pela intersecção do cone de sombra da Lua com a superfície terrestre. Num dado ponto da faixa, o eclipse será total enquanto aquele se mantiver na sombra da Lua. Essa sombra desloca-se sobre a superfície terrestre, de Oeste para Este, a uma velocidade aparente maior ou igual a 1600 Km/h. Com efeito, o movimento da sombra resulta essencialmente da composição da rotação da Terra com o movimento lunar em torno desta (ambos em sentido directo), dependendo também do grau de obliquidade da incidência e ainda da latitude. Resulta destes dois últimos factores que a velocidade mínima se obtém sobre o equador e para incidência vertical (Sol no zénite do lugar). Assim, em Aden, onde o eclipse ocorreu pouco depois do nascer do Sol, a totalidade teve uma duração de 3 minutos e meio. Na Índia, onde foi observado ainda de manhã, teve já uma duração de cerca de cinco minutos e meio. E na

acompanhados do Tenente de Marinha Rziha, encarregado das medições espectroscópicas, escolheram as imediações de Áden como ponto de observação [5]. Também a expedição fotográfica prussiana, constituída pelos astrónomos Tiele, Vogel², Zenker e Fritsch se estabeleceu em Áden [6]. Mas foi na Península Hindustânica que se concentrou a maioria das expedições. De um total de sete, todas equipadas com espectroscópios, cinco eram inglesas [2,3,7-9]: em Jamkhandi, da Royal Society, dirigida pelo Tenente Herschel; em Guntur o Major Tennant, da Royal Astronomical Society e do Governo da Índia, comandando um destacamento de sapadores; em Bijapur os Capitães Haig e Tanner, e o matemático do Colégio do Decão Kero Laxuman; em Mongoli (aldeia seis milhas a este de Mulwar, por sua vez 18 milhas a sul de Bijapur) o astrónomo Chambers, do observatório de Bombaim; em local indeterminado o astrónomo Pogson, do observatório de Madrastra. Das duas restantes expedições, uma era prussiana, composta pelos astrónomos Spörer, Tietjen, Engelmann e Koppe (em Mulwar) e a outra francesa, do Bureau des Longitudes e Academia das Ciências de Paris, composta pelo físico Janssen e pelo Aspirante Rédier (em Guntur).

Na Península de Malaca, numa praia a cerca de sessenta léguas de



Bangucoque, instalou-se a principal expedição francesa, constituída entre outros pelos astrónomos Stephan, Tisserand e Rayet do Observatório Imperial, estando Rayet incumbido das observações espectroscópicas. Finalmente, em Mantawalu, ilha do golfo de Tomini (Celebes), o astrónomo Oudemans, de Amsterdão, na companhia de espanhóis idos expressamente das Filipinas, realizou várias observações não espectroscópicas [10]. O eclipse foi ain-

Figura 2 - Linha de centralidade do eclipse de 18 de Agosto de 1868, indicando-se alguns dos pontos de observação.

da estudado e descrito em muitos outros pontos, nomeadamente na ilha de Bornéu, pelo governador inglês de Labuan, e a bordo de vasos mercantes e de guerra de várias nacionalidades, que se encontravam espalhados ao longo da faixa de totalidade. O fenómeno era esperado e sabia-se da sua singularidade.

Descrição do eclipse total do Sol de 18 de Julho de 1860, apresentado por G. Wolf em Espanha [2]

Península de Malaca, onde ocorreu perto do meio-dia e do equador, teve a duração máxima de 6 minutos e 47 segundos. Em Labuan, no noroeste de Bornéu, ocorreu já de tarde, mas ainda muito perto do zénite. Finalmente, nas Celebes, o Sol estava mais próximo do ocaso, embora ainda alto no céu. Apesar de em Áden o eclipse se ter dado pouco depois do amanhecer, e de nas Celebes ter acontecido de tarde (pelas 14.20), a diferença temporal real entre os dois acontecimentos foi muito mais pequena: cerca de 2 horas e 45 minutos, tempo necessário para o cone de sombra passar de um ponto a outro.

Durante a totalidade, o céu não se apresenta completamente escuro, sobretudo junto ao horizonte, devido à luz que penetra fora da zona de totalidade e é dispersa pela atmosfera para o interior desta. O grau de claridade durante a totalidade é contudo

muito variável, dependendo da altura do ponto de observação, da orografia, da proximidade do local em relação à linha de totalidade (centro da oval de sombra) e do estado

dispersivo da atmosfera durante o eclipse. Pode no entanto ser tal que seja impossível ler e distinguir objectos, como sucede numa noite sem luar.

Déjà la lune a mordu le disque du soleil; l'astre brillant est réduit à un mince croissant. Autour de nous, les bruits cessaient peu à peu, comme au crépuscule du soir, et le ciel était envahi d'une teinte lugubre, passant par tous les tons du jaune jusqu'au violet, et rendue plus triste encore par les riches couleurs dont s'empourrait la brume à l'horizon: on eût dit que le soleil se couchait aux quatre coins du ciel. Puis partout silence complet, le dernier rayon de soleil venait de disparaître. Et alors, sur nos têtes, comme si un rideau était tiré tout à coup, éclatait dans sa magnificence le splendide spectacle de l'éclipse. Autour du disque de la lune, de la teinte sombre du bronze, une éblouissante couronne d'argent d'où s'élançaient des rayons ou des gloires, en quatre grands jets rectilignes, avec d'autres en forme de lyre. Puis, sur cette couronne, des flammes roses d'une richesse indescriptible de nuance, dont la principale semblait trembler au souffle d'un vent léger. Peu à peu le mouvement de la lune, de l'ouest à l'est, couvrait ces flammes, et, de l'autre côté, découvrait une bordure de perles roses ou de nuages moutonnés, courant tout le long de son disque. Puis, un cri universel sortait à la fois de toutes les poitrines: le soleil avait lancé son premier rayon comme un éclair, l'éclipse était finie.

RELATOS DAS EXPEDIÇÕES PRINCIPAIS

A expedição austríaca largou de Trieste, porto de mar do Império Austro-Húngaro, rumo a Alexandria [5]. Daí seguiu para Suez presumivelmente de comboio, a partir do Cairo (o canal só seria inaugurado no ano seguinte), onde tomou novo barco para Áden. A viagem pelo Mar Vermelho foi difícil de suportar, pela conjugação de humidade e temperatura elevadas, e da frequente falta de vento. Em Áden, os astrónomos (austríacos e prussianos) foram bem acolhidos pelo governador inglês, tendo-lhes sido disponibilizados homens da guarnição e serviços nativos. A conselho de oficiais ingleses, escolheu-se como ponto de observação uma elevação não longe da cidade. A ligação logística era feita por uma caravana diária de dromedários e solípedes. No dia do eclipse, que em Áden se dava logo após amanhecer, o céu matinal apresentava-se muito nublado. As observações só puderam fazer-se durante pequenas aberturas, e, embora se tenham observado e medido as protuberâncias, a análise espectral das mesmas foi um fracasso. A missão prussiana, por seu lado, pôde tirar três fotografias, das quais apenas uma (Figura 3) saiu em boas condições [3].

A expedição da Royal Society, dirigida pelo Tenente Herschel (1837-1921, filho e neto de astrónomos distintos),

estabeleceu-se em Jamkhandi, no planalto do Decão. Uma vez chegado à Índia, Herschel estudara a distribuição espacial da precipitação durante o mês de Agosto e concluíra que Bijapur e Jamkhandi eram dos locais onde menos chuva caía. Os oferecimentos de hospitalidade por parte de um chefe local, residente em Jamkhandi, levam-no a optar por esta localização. O grosso da expedição parte finalmente de Bangalore em 7 de Julho, transportando os instrumentos, um observatório desmontável e restante equipamento. Para percorrer as 390 milhas que a separam de Jamkhandi, demora 31 dias, o que Herschel considera aceitável, dada a inexistência de estradas e o tempo adverso. Ele próprio parte a 1 de Agosto, para chegar a 14. Há que montar o observatório e testar os instrumentos, quase sempre com céu nublado. Por fim, chega o dia do eclipse. Quinze segundos antes da totalidade, uma espessa nuvem encobre o Sol. Mas alguns segundos depois da totalidade, o Sol eclipsado estava de novo visível e distinguia-se uma longa protuberância "em forma de dedo" [9,11].

Apontando-lhe a luneta, a imagem espectroscópica foi imediatamente a de três riscas brilhantes (vermelha, laranja e azul), sem qualquer espectro contínuo sobreposto. Emocionado, Herschel grita ao assistente "vermelho, verde, amarelo", pensando ter dito as cores correctas. Após algumas hesitações, e apesar das nuvens que se sucediam, interrompendo de quando em quando as observações, Herschel procedeu à determinação do

comprimento de onda das riscas, embora sem grande rigor. Vermelha e azul seriam próximas das riscas C e F do hidrogénio, respectivamente, e a laranja parecia coincidir com a risca D do sódio. Mas para o grau de precisão evidenciado, a identificação certa das riscas observadas com as riscas de referência não era possível. Concluiu-se no entanto que as protuberâncias eram formadas por gases incandescentes.

Foi nas ruínas da antiga cidade fortificada de Bijapur que a missão de Haig se instalou. A estação de observação escolhida era uma sólida torre de 20 metros de altura e quase outros tantos de diâmetro, no alto da qual ainda se encontravam dois velhos canhões, um dos quais com mais de 9 metros de comprimento. O vento era muito forte, o que prejudicou bastante as observações, tendo chegado mesmo a derrubar uma luneta. O início da totalidade, pelas 9 da manhã, não foi visível, devido à interposição de nuvens. Mas pouco depois o Sol eclipsado apresentava-se a descoberto e Haig de imediato aponta o pequeno espectroscópio portátil de que dispunha a duas protuberâncias próximas, cujo espectro, idêntico, apresenta duas riscas, uma vermelha e outra dourada. O espectro da coroa, também observado, era de fraca intensidade mas contínuo.

A missão germânica, em Mulwar, teve pouca sorte com as condições atmosféricas, e apenas pôde ver o Sol eclipsado durante escassos cinco segundos, só tendo tido tempo para medir a dimensão angular das protuberâncias. Também o astrónomo Chambers nada conseguiu observar, em consequência de um manto cerrado de nuvens. Por sua vez, Pogson observou igualmente o espectro de emissão das protuberâncias, observando F, D ou próxima de D, e duas outras riscas entre D e E, mas não parece ter publicado os seus resultados.

A expedição dirigida pelo Major J.F. Tennant (1829-1916) obteve também resultados positivos. As observações espectroscópicas, levadas a cabo pelo próprio Tennant, incidiram sobre a grande protuberância, a que chamou "The Great Horn". O seu espectro apresentava várias riscas, uma vermelha, uma laranja, outra verde, múltipla, e ainda outra, difícil de ver, no azul. A risca vermelha exerceu sobre ele um fascínio especial: "One line in the red was so beautiful that it needed an effort to turn my attention to anything else" [7]. A atribuição das riscas foi mais uma vez algo incerta: C, a vermelha; D,

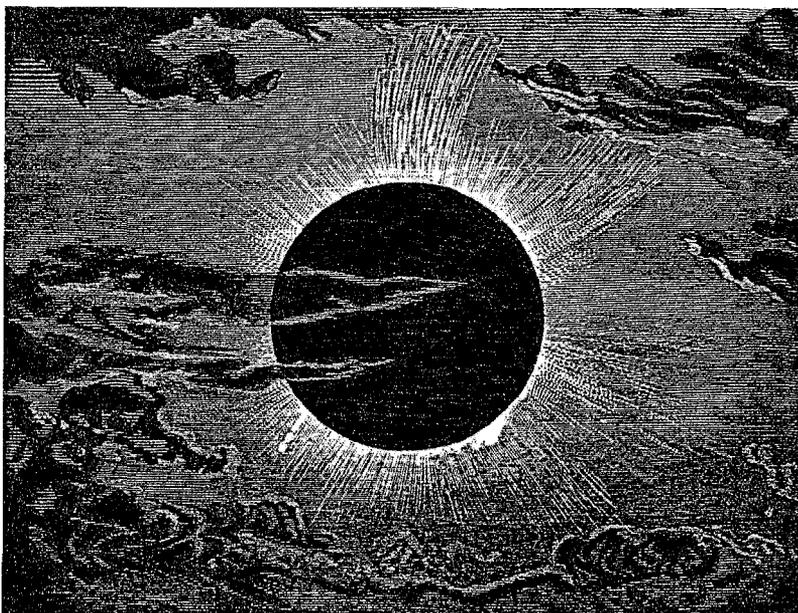
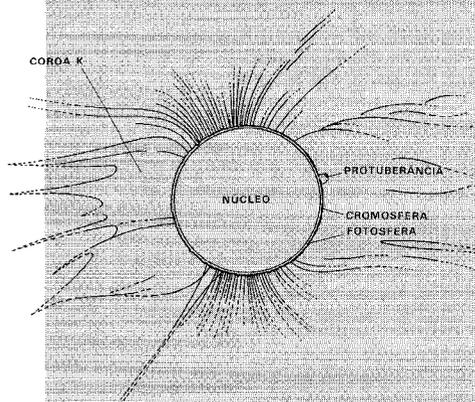


Figura 3 - Aspecto do eclipse, tal como se apresentou em Áden. Gravura executada a partir das fotografias de Vogel e Fritsch [2].

II. O Sol

O Sol tem uma estrutura e dinâmica complexas, ainda incompletamente conhecidas. É constituído quase exclusivamente por hidrogénio e hélio; em percentagem molar, tem-se 90% de hidrogénio, 9% de hélio e 1% dos restantes elementos (principalmente carbono, azoto, oxigénio, néon, magnésio, silício e ferro). O seu núcleo é extremamente denso (cerca de 10^2 g/cm³) e encontra-se a uma temperatura de 15 milhões de Kelvin. É aí que o hidrogénio é lentamente convertido em hélio, numa sequência de



Representação esquemática da estrutura solar

reações nucleares. A energia libertada sob a forma de radiação difunde-se até à região superficial do Sol, num processo que demora vários milhares de anos. Ao atingir esta, escapa-se finalmente para o espaço, chegando por exemplo à Terra em 8 minutos. A camada solar superficial, ou fotosfera, a partir da qual os fótons saem para o exterior e que é pois a superfície visível do Sol, tem uma densidade muito baixa ($\sim 10^{-4}$ atm) e uma temperatura de aproximadamente 5800 K, emitindo um espectro contínuo muito semelhante ao do corpo negro a essa temperatura. Essa emissão é sobretudo devida ao ião H⁺, que se forma com facilidade dada a abundância de átomos de hidrogénio e de electrões livres provenientes de metais ionizados. Esta emissão contínua apresenta contudo diminuições abruptas de intensidade a certos comprimentos de onda. São as chamadas riscas de Fraunhofer (observadas por este em 1814), em número superior a 26.000 mas das quais apenas um pequeno número é relativamente marcado. Estas riscas devem-se à presença de uma zona exterior mais fria, que absorve radiação mas emite menos do que a 5800 K. As riscas escuras correspondem assim aos comprimentos de onda de absorção dos átomos (e moléculas diatómicas) presentes nessa zona mais fria. O espectro solar observado na Terra tem ainda outras riscas escuras adicionais na região do visível, ditas telúricas, pois são devidas à absorção pelos gases atmosféricos terrestres, sobretudo

O₂ (transições singuleto-triplete) e H₂O (transições vibracionais). A temperatura da atmosfera solar decresce com a altitude até ao valor mínimo de 4200 K a algumas centenas de quilómetros, para recomeçar a subir depois, atingindo 10.000 K a cerca de 2000 Km. A camada entre o mínimo e os 10⁴ K é designada por cromosfera (nome devido a Lockyer), pois tem uma cor rósea, resultado da predominância no visível da emissão correspondente à riscas C(H α) do hidrogénio atómico. O espectro de emissão da parte inferior da cromosfera, observável por breves instantes imediatamente antes e imediatamente depois de um eclipse total, e dito por isso espectro-relâmpago, reproduz qualitativamente o espectro de Fraunhofer, mas em riscas brilhantes. Acima da cromosfera tem-se a última e mais extensa camada: a coroa. Extremamente rarefeita ($< 10^{-12}$ atm), a sua região interna (coroa K), que se estende até cerca de 2 raios solares (1.4 milhões de Km) tem uma temperatura elevadíssima: cerca de 2 milhões de kelvin. Nessas condições, predominam os electrões livres e os elementos em graus de ionização elevados, isto é, tem-se um plasma. O hidrogénio e o hélio, por exemplo, encontram-se predominantemente na forma H⁺ e He²⁺, enquanto que ferro, níquel e cálcio estão, entre outras, nas formas Fe¹³⁺, Ni¹³⁺ e Ca¹²⁺. O espectro da tênue emissão da coroa K é contínuo, sendo o resultado da dispersão da radiação fotosférica pelos electrões livres. Contudo, não apresenta riscas de Fraunhofer, pois como a temperatura é muito

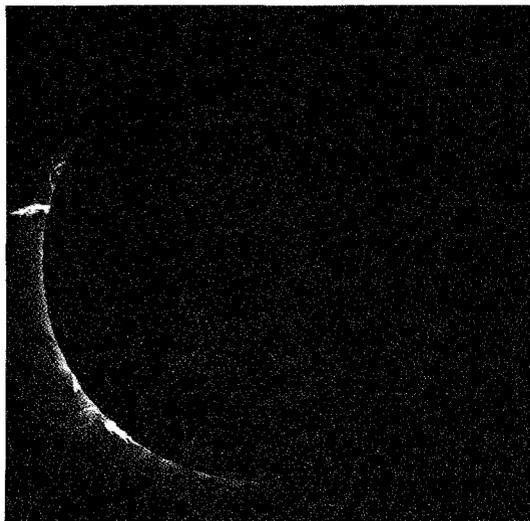
a laranja; e talvez b (magnésio), a verde. Concluiu assim que "a protuberância era formada por vapores incandescentes, compostos por hidrogénio, sódio e magnésio". Verificou-se ainda que a emissão era despolarizada, ao contrário da da coroa, que apresentava além disso um espectro contínuo. Foram obtidas seis fotografias do Sol eclipsado, com protuberâncias bem visíveis (Figura 4).

A algumas centenas de metros de Tennant estava a estação de observação de Pierre Janssen (1824-1907). Viajando de França a Madrastra no paquete "L'Impératrice", da Mala Imperial, e depois em novo vapor para Masulipatão, destino previsto da expedição, Janssen acabou por escolher Guntur, mais para o interior. Situada a meia distância entre os contrafortes dos Gates Orientais e a costa do Índico, permitiria em princípio evitar quer as brumas marítimas, quer as nuvens de montanha. Guntur havia sido efémera possessão francesa no Séc. XVIII, e ainda aí viviam descendentes dos colonos iniciais, um dos quais, rico comerciante de algodão, pôs o terraço da sua casa à disposição de Janssen para que nele fosse montado o equipamento [12]. Segundo nos relata Janssen, o tempo apresentou-se excepcionalmente chuvoso e enevoado até à véspera. Felizmente, a 18 de Agosto o dia nasceu com o céu quase limpo, e assim se manteve até ao termo do eclipse. Em estado de grande tensão, Janssen e os seus colaboradores, em que se incluíam fami-

liares do anfitrião, realizavam afanosa mente as medições programadas à medida que o eclipse se ia desenrolando. A observação do bordo do disco solar com o espectrocópio (através da luneta), apresentava o espectro de riscas escuras sobre fundo brilhante característico. Mas eis que se atinge a totalidade, e se fazem trevas. No mesmo instante, o espectro muda por completo. Sobre um fundo cinza claro, destacam-se agora, nítidas, uma, duas cinco ou seis riscas brilhantes de várias cores: vermelha, amarela, verde, azul, violeta [12]. O espectro é idêntico para duas protuberâncias que se destacam do disco momentaneamente negro. Uma tem a forma de uma longa língua de fogo. A outra, assemelha-se a uma cadeia de montanhas nevadas, vista ao pôr-do-sol [12]. Estava atingido o objectivo da expedição. E era tempo, pois o céu voltava a cobrir.

Dos resultados obtidos, Janssen concluiu que as protuberâncias eram gasosas, e de composição constante: havia observado o mesmo espectro em duas protuberâncias separadas de muitos milhares de quilómetros. Deduzia ainda que o hidrogénio era o elemento dominante pois as riscas vermelha (res-

Figura 4 - Fotografia do Sol eclipsado, obtida em Guntur (tempo de exposição: 5 s) [7].



elevada o efeito de Doppler sobre o contínuo anula-ascompletamente. Além do contínuo fotosférico, observam-se riscas de emissão de metais (e alguns não metais) em estados de ionização elevados (Quadro II).

As protuberâncias solares são elevações de matéria gasosa ($\sim 10^8$ atm) a grande altura (vários milhares de quilómetros), com temperaturas próximas das cromosféricas, constituindo como que prolongamentos temporários desta no interior da coroa. Nos eclipses, apresentam-se como zonas luminosas no bordo da Lua, destacando-se contra o céu escuro. As protuberâncias formam-se frequentemente como gigantescos arcos ou séries de arcos, de matéria cujas bases mergulham na fotosfera e que depois evoluem lentamente, durante semanas ou meses (protuberâncias estacionárias), até que terminam por ejeções bruscas e violentas, com velocidades que atingem centenas de quilómetros por segundo e temperaturas muito elevadas. Estas erupções são consequência da reorganização dos campos magnéticos que sustentavam as protuberâncias. Pensa-se que a energia libertada no decurso das ejeções de matéria poderá ser a causa do aquecimento da coroa. As protuberâncias normalmente observadas são casos raros e extremos que envolvem grandes massas de matéria, provindo a maior parte da energia de fenómenos análogos mas em menor escala e muito mais frequentes.

sem dúvida as C e F de Fraunhofer. Logo no dia seguinte envia um telegrama ao presidente do Bureau des Longitudes (que chega a 22), talvez a primeira notícia recebida na Europa sobre o eclipse: "Eclipse observed, Protuberances, Spectrum very Remarkable and unexpected, Protuberances gaseous nature" [13].

Tal como Guntur, a praia de Wha-Tonne, na costa leste da península de Malaca, estava abrigada da monção de sudoeste por uma cadeia montanhosa. O local era inóspito, quase sem vida animal e sem água potável. Uma densa floresta pantanosa chegava até à praia, banhada pelas água tépidas do Golfo de Sião. Por ordem do rei siamês, Rama IV^o, haviam sido erguidas uma paliçada e algumas casas de bambu para alojar os convidados europeus. Um observatório temporário fora construído pelos carpinteiros da canhoneira "Le Frêlon", que precedera a missão científica. Desde o dia 14 de Agosto, o rei do Sião, que no dizer zombeteiro de Rayet "se piquait fort d'astromie", instalara-se com a sua numerosa corte a um quilómetro a norte da expedição francesa. O cenário era singular, naquele local habitualmente deserto: para além do intenso movimento em terra, fun-

deavam no mar quinze navios a vapor do rei, e ainda o navio de transporte francês e um barco inglês. No dia do eclipse, as várias fases do mesmo (contactos) foram saudadas por outros tantos tiros de canhão, comandados pessoalmente por Sua Majestade. Segundo Rayet confessa com alguma malícia, os astrónomos franceses tinham previamente comunicado esses instantes ao astrónomo real e chegado mesmo ao ponto de acertar um dos relógios de Rama IV [3].

O dia 18 amanhecera com o céu limpo. Mas às nove horas o Sol desaparecera por detrás de nuvens carregadas de chuva, e o tempo piorava cada vez mais. O primeiro contacto foi invisível. No entanto, dez minutos antes do segundo contacto (início da totalidade), uma aberta descobre o Sol. Felizmente, essa aberta perdurará até ao terceiro contacto (fim da totalidade), permitindo a observação completa da parte mais importante do eclipse.

Os resultados espectrais obtidos pelo jovem astrónomo Georges Rayet (1839-1906) foram, de todos, talvez os mais completos, o que se deveu à conjugação de quatro factores: maior abertura do telescópio usado (um reflector de 20 cm); espectroscópio relativamente pouco dispersivo; maior obscuridade durante a totalidade; maior duração da totalidade. Assim que se dá a obscuridade total, Rayet dirige a fenda do espectroscópio para a protuberância "em forma de chifre", e vê aparecer um espectro de nove riscas brilhantes, muito intensas, sobre um fundo cinza-claro, o que o faz soltar um grito de contentamento [3]. Pela posição das riscas, identifica-as - à excepção de uma - com riscas de Fraunhofer, respectivamente B, D, E, b, F, duas riscas de G [13] (estas atribuições são imprecisas; B era por exemplo C). Rayet dirigiu em seguida o seu telescópio para outro grupo de protuberâncias, em forma de cadeia montanhosa, obtendo um espectro semelhante ao primeiro, com excepção de uma risca violeta que desta feita não era visível. Concluiu assim que as protuberâncias eram factos de matéria gasosa incandescente, "chamas de um fenómeno químico de extrema potência", e de composição química algo variável. A expedição do Observatório levantou ferro de Wha-Tonne logo a 19 de Agosto, abandonando o mais depressa possível a costa insalubre. Apesar disso, vários expedicionários viriam a padecer por longos meses de febres intensas contraídas em terra. Rama IV

ÉCLIPSE DE SOLEIL DU 18 AOUT. — Trois grandes expéditions scientifiques avaient été envoyées dans l'Inde pour y observer cette éclipse, la plus importante du siècle. L'expédition anglaise, la plus nombreuse des trois, organisée par la Société royale de Londres et l'Observatoire de Greenwich, a envoyé des dépêches télégraphiques, cette semaine, à l'Association britannique pour l'avancement des sciences, en ce moment en session à Norwich. Il paraît que quelques nuages ont gêné ses observations. Des deux expéditions françaises, celle qui a été organisée par l'Observatoire de Paris n'a pas encore donné de ses nouvelles. On a reçu, au contraire, une dépêche télégraphique de M. Janssens, chargé par le bureau des longitudes d'observations d'analyse spectrale et de physique du globe. M. Janssens annonce que le spectre des protuberances rosacées lui a présenté des particularités inattendues, et démontre la nature gazeuse de ces corps.

Figura 5 - Notícia publicada na "Revue des Cours Scientifiques"

faleceria em Outubro desse ano, também em consequência de doença contraída em Wha-Tonne.

BALANÇO CIENTÍFICO

As observações espectroscópicas efectuadas permitiam concluir da natureza gasosa das protuberâncias, o que concordava com a ausência de polarização. As riscas observadas mostravam além disso que o hidrogénio era um dos constituintes principais, se não o principal, das mesmas [12,15]. A comparação das protuberâncias observadas em diversos pontos da faixa de totalidade, e portanto em diversos instantes, fornecia além disso as primeiras informações sobre a sua evolução temporal [16]. O outro grande resultado das missões, embora negativo, era também importante. Ninguém pretendia ter visto o espectro de emissão devido à "camada inversora" de Kirchhoff, o que implicava uma espessura muito pequena ou nula para esta [2].⁴ Muitas noções sobre a estrutura e dinâmica do Sol mantinham-se contudo incorrectas, e só muito mais tarde viriam a ser rectificadas. Por exemplo, persistia a ideia de o espectro contínuo de emissão da fotosfera ser devido à combustão de hidrogénio (molecular^o) em condições de pressão elevada.

O Sol e as outras estrelas seriam assim fornalhas imensas, hipótese que vinha aliás já do Século XVIII (o século do oxigénio e das combustões) e está expressivamente cristalizada na constelação austral a que o astrónomo La Caille (1713-1762), aliás professor de Lavoisier, chamou *Forax Chemica*.

UM DESENVOLVIMENTO INESPERADO

Não era satisfatório poder observar as protuberâncias apenas durante os breves momentos de obscuridade de um



Figura 6 - Medalha cunhada pela Academia das Ciências de Paris para comemorar o novo processo de estudo das protuberâncias, desenvolvido independentemente por Janssen e Lockyer. Pierre César Jules Janssen principiou por trabalhar num banco, tendo-se doutorado em 1860. Dirigiu várias expedições científicas para o estudo do magnetismo terrestre (Perú 1857, Açores 1867), da Física do Sol e da atmosfera (Itália 1861, Índia 1868). Fundou os observatórios de Meudon (onde tem uma estátua) e do Monte Branco. Sir Joseph Norman Lockyer começou por ser funcionário do British War Office, dedicando-se à astronomia como amador. Fundou em 1869 a revista *Nature*. Dirigiu os observatórios de South Kensington e Sidmouth. Organizou oito expedições para a observação de eclipses. Foi autor de várias obras sobre espectroscopia e astrofísica, bem como de um livro sobre golfe.

eclipse total. Por um lado, estes são raros (dois por ano, no máximo) e apenas observáveis em faixas do globo nem sempre favoráveis. Por outro, o estudo da dinâmica das protuberâncias e restante atmosfera solar precisava de maiores tempos de estudo continuado. Na noite de 18 para 19 de Agosto, Janssen não adormece, pensando sem cessar no modo de ultrapassar a dificuldade. E encontra a solução. Bastava usar uma fenda suficientemente estreita, disposta tangencialmen-

te ao disco solar, para apenas captar a radiação devida à protuberância, isolando-a do fundo intenso fotosférico. Janssen está a pé desde as três da manhã de 19 de Agosto, impaciente por testar a sua técnica. Pelas 10 horas, assim que o Sol irrompe por entre a neblina matinal, reencontra imediatamente as riscas brilhantes que entrevira fugazmente na véspera. Que alegria não terá sentido!

Depois, realiza até 4 de Setembro observações quase ininterruptas das protuberâncias, como se de um eclipse de 17 dias se tratasse.

Entretanto, em Inglaterra, o astrónomo Joseph Lockyer (1836-1920) vinha fazendo desde há quase dois anos e meio tentativas semelhantes mas sempre sem êxito o que levava a concluir (e publicar) não serem as protuberâncias gasosas. Os relatos do eclipse recebidos na Europa, em especial os de Rayet, Herschel e Tennant, mostraram-lhe que estava errado. Atribuía agora os seus próprios insucessos ao pouco poder dispersivo do espectroscópio que usara. Um novo aparelho, construído expressamente para a observação do eclipse mas cuja construção e uso se tinham atrasado devido a doenças graves, tanto sua como do fabricante, ficou finalmente pronto e testado em 20 Outubro de 1868. Ainda na manhã desse mesmo dia, no seu observatório particular, situado no jardim da sua casa em Wimbledon, Lockyer consegue ver o espectro de emissão de uma protuberância. Este apresenta três riscas: C e F, devidas ao hidrogénio, e uma terceira, próxima de D

mas não coincidente com esta, "diferindo de 8 ou 9 graus da escala de Kirchhoff" [17]. No mesmo dia em que o relato de Lockyer chega à Academia das Ciências de Paris, e com um intervalo de poucos minutos, é recebido o primeiro relato de Janssen, datado de 19 de Setembro, em que esta apresenta o mesmo método de observação das protuberâncias no Sol normal [18].

O relatório completo de Janssen [19], datado de 3 de Outubro, só chegará em 1869 à Academia, em consequência de um arrelíador erro postal.

Põe-se desde logo a questão da prioridade da descoberta: Lockyer ou Janssen? Embora a ideia tivesse sido avançada primeiro por Lockyer, os resultados negativos obtidos tinham-no feito chegar a conclusões incorrectas, e só as observações alheias feitas durante o eclipse o haviam levado de novo ao bom caminho. Além disso, a primeira observação de Janssen (19 de Agosto) era sem dúvida anterior à de Lockyer (20 de Outubro).

A Academia das Ciências de Paris, pela voz de H. Faye [20], concluiu pois que "em vez de dividir os méritos da descoberta, enfraquecendo-os, é preferível atribuir indistintamente a sua honra aos dois homens de ciência que, separados por vários milhares de léguas de distância, tiveram a felicidade de perscrutar o intangível e o invisível pelo talvez mais espantoso meio de observação jamais concebido pelo engenho humano".

Por esta descoberta, e entre outras distinções, Janssen e Lockyer receberam em conjunto a medalha de ouro da Academia das Ciências de Paris. (Figura 6; ver Destaque III).

Outros astrónomos haviam imaginado um método alternativo de observação das protuberâncias e cromosfera com um Sol não eclipsado. Pouco depois dos resultados de Janssen e Lockyer serem conhecidos, Huggins recorda que propusera e tentara já o uso de um filtro monocromático. Como a emissão das protuberâncias se concentrava em algumas riscas intensas, deveria ser possível observá-las anulando o contínuo fotosférico por meio de um filtro que apenas deixasse passar radiação com o comprimento de onda de uma das riscas. Também Herschel tivera a mesma ideia após observar as protuberâncias. Mas as dificuldades de construção de um tal filtro só viriam a ser ultrapassadas por Lyot em 1933.



III. Um medalhão alusivo

Existe nas lojas da Imprensa Nacional-Casa da Moeda (INCM) um quadro circular em cobre, de 23 cm de diâme-

tro, representando Apolo e o seu carro em baixo-relevo. O filho de Zeus aponta um disco solar onde são visíveis protuberâncias tais como no-las descrevem os observadores do eclipse de 18 de Agosto de 1868. Encimam os dizeres: *Analyse des Protuberances Solaires. 18 Aout 1868.*

Não pudémos estabelecer a origem e motivação primitivas da Casa da Moeda para a feitura deste "galvano" (chapa obtida por galvanoplastia). A matriz existente na CM é no entanto bastante antiga. A presente série, com 2 ou 3 anos, obedeceu a critérios puramente estéticos.

O "galvano" é uma reprodução, ampliada, de uma das faces da medalha que a Academia das Ciências de Paris mandou cunhar em comemoração do feito de Janssen e Lockyer (Figura 6).

UM NOVO ELEMENTO?

A importância da pequena diferença de comprimentos de onda (menos de 2 nm) entre a risca amarela/laranja solitária das protuberâncias e a risca D dupla do sódio não passou despercebida. Assinalada desde 20 de Outubro por Lockyer, a divergência foi rapidamente confirmada e quantificada por vários astrónomos, entre eles o Padre Secchi, S.J., do Collegio Romano [21,22] e Rayet [23]. Também Janssen, ainda na Índia, em Nota datada de 19 de Dezembro [24], refere, talvez forçadamente, ter constatado o mesmo desde o dia do eclipse, mas não dando sequer o comprimento de onda da nova risca, ao contrário de Secchi e Rayet (588.0 nm e 587.4 nm, respectivamente, bastante próximos do valor correcto, 587.6 nm; para comparação, note-se que o duplete do sódio fica a 589.0 nm (D_2) e 589.6 nm (D_1)⁶).

Rayet é aliás o primeiro a aventar a hipótese de uma nova risca amarela, dita D_3 , ser devida a um gás desconhecido [14,23]. Frankland e Lockyer, por seu lado, inclinam-se mais para que ela seja devida ao hidrogénio [24]. Ao mesmo tempo, Lockyer avança um nome para a substância produtora da risca, e que ele tenta sem sucesso reproduzir em laboratório com hidrogénio: "*for laboratory use, the substance which gave rise to the line in the yellow, I named helium.*" [25] (ver Destaque IV). Lockyer verá depois o hélio como uma forma de hidrogénio estável a altas temperaturas [25,26]. Com efeito, foi proponente e defensor acérrimo da teoria da evolução inorgânica, segundo a qual os elementos se dissociariam em formas cada vez mais simples, à medida que a temperatura se elevasse. Hoje reconhecemos nessas formas sucessivos estados de ionização de vários elementos.

A existência de uma nova substância, desconhecida na Terra, fora proposta e recebida com reserva. As pressões e temperaturas no Sol poderiam ser tais que a risca pertencesse a um elemento conhecido, tal como o hidrogénio. A situação era de alguma incerteza, como o reconhecia W. Thomson (mais tarde Lord Kelvin) em 1871, ao afirmar, em sessão da British Association "Frankland and Lockyer find the yellow (*sic*) prominences to give a very decided bright line not far from D, but hitherto not identified with any terrestrial flame. It seems to indicate a new substance, which they propose to call Helium" [27].

O eco da descoberta junto dos químicos

foi quase nulo. Num tratado de Química de 1889 [28] refere-se o espectro das protuberâncias para se dizer que estas apresentam "riscas brilhantes coincidentes com as do hidrogénio, com uma das do magnésio e *aproximadamente coincidentes* com as do sódio", sem qualquer menção ao hipotético hélio. Este ainda teria de esperar até 1895 para se ver reconhecido como novo elemento, em consequência do seu isolamento na Terra. Até lá não passaria de mais um dos elementos fantasma em que a Análise Espectral foi fértil (Quadro II).

AGRADECIMENTOS

À Dr^a Alfredina do Campo, pelo auxílio prestado nas pesquisas bibliográficas realizadas no Observatório da Ajuda, e ao Dr. John Hearnshaw (Universidade de Canterbury, Christchurch, Nova Zelândia), por informações sobre N. Pogson.

Quadro II. Alguns elementos inexistentes sugeridos pela Análise Espectral

NOME PROPOSTO	RISCAS CARACTERÍSTICAS *	PRIMEIRA OBSERVAÇÃO *	ATRIBUIÇÃO CORRECTA
HÉLIO	447.1, 471.3, 587.6 (D_3); 706.5; 1083.0	Protuberâncias solares (Herschel, Tennant, Janssen, Rayet, Haig, Pogson, 1868)	hélio no estado triplete (ortohélio)
ASTÉRIO	492.2; 501.6; 667.8 °	hélio gasoso (Runge e Paschen, Lockyer, 1896)	hélio no estado singuleto (parahélio)
PROTOHIDROGÉNIO	454.2; 541.2; 1012.4 ° (série de Pickering)	estrela ζ Puppis (Pickering, 1896)	hélio ionizado He ⁺ (Bohr, 1913)
NEBÓLIO	372.8; 495.9 (N_1); 500.7 (N_2)	várias nebulosas gasosas (Huggins 1864, 1882)	oxigénio atómico ionizado O ⁺ (372.8 nm) O ²⁺ (N_1 e N_2) (Bowen, 1927)
CORÓNIO	530.3 °	coroa solar (Pogson, Rayet, 1868)	ferro ionizado, Fe ¹³⁺ (Edlén, 1942)
GEOCORÓNIO	557.7	auroras polares	oxigénio atómico (transição proibida) (McLennan e Shrum, 1924)

* comprimentos de onda no ar, em nm.

° Os primeiros observadores nem sempre foram os proponentes da existência do novo elemento.

° Riscas observadas previamente por Lockyer na nebulosa do Orion, em 1890.

° Algumas riscas do He⁺ foram observadas anteriormente, nomeadamente 468.6 nm (que não pertence à série de Pickering) numa estrela da constelação do Ciano por Wolf e Rayet em 1867.

° Na região visível, observam-se muitas outras riscas menos intensas, devidas a outros elementos ionizados, ou ao ferro em outros estados de ionização, e.g. Fe⁹⁺ (637.4 nm), Ca¹²⁺ (408.6 nm).

NOTAS

¹ Autor do *Canon das Eclipses* (1887), monumental obra que reúne parâmetros e mapas referentes a 8000 eclipses solares e 5200 eclipses lunares, cobrindo o período de 1207 a.C. a 2161 d.C. Actualmente existem programas para computadores pessoais (e.g. ECLIPSIM) que realizam os mesmos cálculos laboriosos, mas com maior rigor e em frações de segundo.

² Notabilizou-se pelos seus estudos do efeito de Doppler em espectros estelares. Deve-se-lhe o conhecido exemplo da variação de frequência do silvo da locomotiva ao passar por um observador imóvel.

³ Retratado no conhecido filme "O Rei e Eu" (*The King and I*, 1956).

⁴ O espectro relâmpago (assim chamado por

Quadro I. Elementos descobertos por análise espectral

NOME	SIGNIFICADO	SÍMBOLO	DATA	DESCOBRIDOR
CÉSIO	L. caesius, azul celeste (das duas riscas azuis)	Cs	1860	Bursen e Kirchhoff
RUBÍDIO	L. rubidius, vermelho (das duas riscas vermelhas)	Rb	1861	Bursen e Kirchhoff
TÁLIO	G. thallos, talo (da risca verde)	Tl	1861	Crookes e Lamy
ÍNDIO	indigo, azul (da risca azul)	In	1863	Reich e Richter
HÉLIO	G. helios, Sol (observado no Sol)	He	1868	Lockyer
GÁLIO	L. Gallia, Gália (França)	Ga	1875	Boisbaudran
HÓLMIO	L. Holmia, Estocolmo	Ho	1878	Delafontaine e Soret
SAMÁRIO	samarските, mineral	Sm	1879	Boisbaudran
DISPRÓDIO	G. dysprositos, difícil de obter	Dy	1886	Boisbaudran
EURÓPIO	de Europa	Eu	1890 1901	Boisbaudran Demarcay

durar alguns segundos) viria a ser observado em 1870 pelo astrónomo americano Haig, durante outro eclipse total. O relato de Haig contém contudo uma descrição que se adapta a este, e poderá ter sido essa de facto a primeira observação. Diz Haig que imediatamente antes de o Sol reaparecer abaixo das protuberâncias que observa, o espectro passou a apresentar várias riscas, destacando-se uma verde e uma azul, com cerca de um quarto de altura das riscas das protuberâncias e correspondendo portanto a uma camada relativamente fina.

⁵ Note-se que se desconhecia à época que o espectro de riscas do hidrogénio era devido ao hidrogénio atómico. A própria realidade de átomos e moléculas não estava ainda bem estabelecida.

⁶ Comprimentos de onda no ar. Os valores de Secchi e de Rayet foram recalculados a partir da posição dada em relação a D.

