

Mais il existe une autre énigme importante dont beaucoup d'astronomes et physiciens se sont occupés et qui, cependant, est demeurée complètement mystérieuse jusqu'à présent. C'est celle des raies d'émission de la couronne solaire. La présente note a pour objet essentiel la discussion générale de l'état actuel de cette question.

2. - Jusqu'en ces dernières années, la couronne solaire était restée un problème réservé exclusivement aux expéditions d'éclipse. Depuis quelque temps toutefois, grâce aux recherches de B. Lyot, la couronne peut être étudiée en dehors des éclipses; en fait, c'est seulement dans la couronne intérieure qu'apparaissent les raies brillantes qui font l'objet de la note actuelle. Nous ne ferons pas l'histoire de la découverte des diverses raies de la couronne; on trouvera un tel historique dans tous les ouvrages concernant les éclipses solaires. Nous nous contenterons de reproduire au tableau I la liste des longueurs et nombres d'onde des 25 raies qu'on peut attribuer avec certitude à la couronne. D'autres lignes ont été observées occasionnellement, mais leur réalité physique n'étant pas certaine, nous ne les avons pas retenues dans notre liste.

Il est important de noter que les raies coronales ne sont pas très fines, mais ont plutôt un caractère diffus; les résultats obtenus au moyen de divers appareils suffisamment dispersifs (spectrographes ou interféromètres) sont concordants en ce qui concerne la largeur des raies qui doit être de l'ordre d'un Angström.

3. - Aucune des raies coronales n'a été observée en laboratoire. D'ailleurs, il est certain que l'on ne peut attribuer ces raies à un nouvel élément chimique — le fameux « coronium » ! Certainement, elles sont dues à un ou plutôt plusieurs atomes connus ou à des combinaisons d'atomes connus, l'émission se faisant suivant un mécanisme spécial non encore découvert.

Sur quels critères astronomiques, peut-on dès lors se baser pour tenter ou pour discuter des identifications?

On pourra d'abord comparer les intensités des raies à différentes éclipses. Il est évident que des raies dues à un atome déterminé dans un certain état d'ionisation et d'excitation, devraient se comporter de même façon relative à différentes éclipses. Une telle comparaison doit être effectuée avec une extrême prudence, étant donné la variation des conditions instrumentales d'une éclipse à l'autre (sensibilité des plaques photographiques; dispersion; emploi de prismes ou de réseaux concaves; emploi ou non d'une fente; etc.).

Un second critère est la structure des spectres pris au spectrographe sans fente. On obtient en effet alors des images monochromatiques de la couronne et il est bien certain que si deux raies coronales sont dues au même atome dans des états analogues d'excitation,

la structure des anneaux coronaux aux longueurs d'onde considérées doit être semblable. Ce critère est le plus sûr.

Un autre moyen de discussion est basé sur la variation d'intensité suivant la hauteur des raies, c'est-à-dire en fonction de la distance

TABLEAU I.
LISTE DES RAIES CORONALES.

λ	ν	Int. moy. (Mitchell)	Int. (Lyot)	Remarques
3328.1	30088.5	8		
3388.10 \pm 0.07	29606.6	20		A
3454.13	28942.5	8		
3600.97	27762.4	10		? Double? B
3642.87	27443.0	3		
3800.77	26803.0	3		C
3986.88	26075.2	8		B C
4086.29	24465.2	6		? Double? C
4231.4	23626.2	8		
4311.5	23187.	2		
4359.	22935.	7		
4567.	21890.	7		
4586.	21799.	2		
5116.03 \pm 0.02	19541.0	2	2.6	
5302.86 \pm 0.02	18362.5	20	120	A C
5536.	18058.5	1	absente	
5694.42 \pm 0.07	17566.2		1.3	
6340.	15768.5			
6374.51 \pm 0.03	16683.1	12	28	C
6701.83 \pm 0.03	14917.2	2	3.3	
7039.62 \pm 0.05	14161.2	4	4	
7891.94 \pm 0.07	12683.		29	
8024.21 \pm 0.10	12458.9		1.3	
10746.80 \pm 0.15	9302.6		240	
10797.95 \pm 0.15	9255.5		150	

Notations: A et B = couples de raies selon Mitchell;
C = raies présentées dans RS Ophiuchi;

Int. Lyot = intensités en 10⁻⁶ d'un angström du spectre continu voisin (mesures de 1936; les intensités de 1937 sont un peu différentes).

au bord du Soleil lorsque la fente du spectrographe est disposée en travers de la couronne.

Enfin, la présence de raies coronales dans une nova peut aussi fournir de précieux renseignements. On a, pour la première fois, observé des raies coronales, dans le spectre de Nova RS Ophiuchi,

le 2 octobre 1932 (cf. raies marquées C dans le tableau I). Si nous pouvions retrouver des raies coronales dans une nova à différents stades de son évolution, nous serions à même d'étudier leur intensité et leur structure dans des conditions physiques nettement différentes. Jusqu'ici, ce critère n'a pas encore pu être employé.

Remarquons encore que toute observation de relation entre les raies coronales et d'autres phénomènes peut être utile. Il en est ainsi par exemple de l'observation de D. H. Menzel suivant laquelle il y aurait une corrélation entre l'excitation dans la chromosphère (ou encore l'intensité des raies de He) et l'intensité de la raie coronale λ 5303 Å. Il faut noter aussi que dans R S Ophiuchi, les raies coronales avaient une structure fort semblable à celle de He+ 4686 Å, et que dans la haute chromosphère, la raie coronale 5303 a été observée associée à des raies de l'hélium (H. D. et H. W. Babcock, 1934).

Naturellement, toute théorie qui fournira l'explication de l'émission des raies coronales donnera du même coup la clef de nombreux phénomènes — non directement spectroscopiques — relatifs à la couronne solaire et non encore expliqués jusqu'ici. Il est vraisemblable aussi qu'une telle théorie introduira des concepts nouveaux importants pour la Physique et l'Astronomie. C'est donc à juste titre que tant de chercheurs se sont efforcés de trouver la clef de cette énigme. Jusqu'ici pourtant, aucun résultat ne peut encore être considéré comme satisfaisant.

Si l'on essaie d'appliquer les tests indiqués plus haut, on constate qu'il est bien difficile à l'heure actuelle de faire des groupements certains de raies. Il y a toutefois des résultats importants. Par exemple, les deux raies intenses 5303 et 6374 se comportent de façon très différente, alors que 3388 et 3503 pourraient avoir une origine semblable. Un résultat général, certain, c'est que le spectre de la couronne solaire n'est pas d'origine unique; il est dû soit à des atomes (ou molécules) différents; soit au même atome dans des états d'ionisation différents; soit encore au même atome, mais excité suivant des processus différents.

Dans toute tentative d'explication, il se présentera aussi des critères purement spectroscopiques: énergie d'ionisation et d'excitation requise; règles d'intensité au sein des séries, des multiplets ou des supermultiplets; etc....

4. - La discussion complète de toutes les tentatives d'identification conduirait à des développements très longs. Nous nous contenterons ici d'un aperçu sommaire que, pour la facilité, nous avons condensé dans le tableau II.

Deux tentatives spécialement intéressantes sont celles basées sur l'oxygène I ou l'hélium I doublement excité. Étant donné le caractère diffus des raies coronales, on est en tout cas tenté de penser

que les niveaux quantiques en cause ont une vie particulièrement courte; c'est le cas notamment pour l'hélium doublement excité.

En 1931, Rosenthal avait cru trouver dans les nombres d'onde

TABLEAU II.
PRINCIPALES TENTATIVES D'IDENTIFICATION.

Auteur	Idées fondamentales	Objection
Nicholson (1911)	Arrangement en séries qui seraient dues à un atome nouveau hypothétique.	Pas de place pour un nouvel atome dans le tableau périodique.
Pannekoek (1922)	Ca ++	Pas de coïncidence convenable.
Freeman (1929)	Argon	Coïncidences à écart trop grand, dues au hasard.
Mecke et Wildt (1930)	Effet Raman atomique.	Certaines composantes de multiplets auraient une diffusion Raman beaucoup plus forte que d'autres.
Rosenthal (1931)	Hélium doublement excité.	Voir plus loin.
Hopfield (1931)	O I	Pure coïncidence approchée de longueurs d'onde.
De Bruin (1932)	O I	Voir plus loin.
Kiehl et Anand (1932)	Molécule H ₂	Coïncidences non satisfaisantes; nombre de molécules H ₂ trop faible.
Boyce et Menzel (1933)	O I	Voir plus loin.
Fender et Vinti (1934)	He doublement excité.	Voir plus loin.
Goudsmit et Wu (1934)	A) He doublement excité. B) Ions négatifs construits sur un état métastable.	Voir plus loin. Ancien calcul de λ effectué jusqu'ici.
H. Beutler (1935)	He doublement excité.	Voir plus loin.
Sekiguti (1936)	Deux raies faibles en 6583.8 et 6548.7 pourraient être des transitions interdites de N II.	Observation douteuse, non encore confirmée (plutôt infirmée).
Rubinowicz (1938)	Certaines raies très faibles observées par Sekiguti seraient des transitions interdites de Fe II.	Observation douteuse, non encore confirmée.
Stratton (1938)		

des raies coronales, des régularités faisant penser à des séries de He I doublement excité (jamais observé en laboratoire). Mais Hylleraas (1931) pense que les séries arrangées par Rosenthal n'ont pas la régu-

¹ En opposition avec le cas des nébuleuses où les raies interdites proviennent de niveaux à vie très longue.

larité compatible avec les séries de Rydberg. Les calculs de Fender et Vinti (1934) ne vérifièrent pas non plus l'hypothèse de Rosenthal. Toutefois, des publications de Goudsmit et Wu (1934) et de Bentler (1935), on peut conclure qu'il n'est pas prouvé à l'heure actuelle que l'hélium doublement excité ne puisse pas fournir l'explication de certaines raies coronales. Les faits d'observation indiqués au n° 3 et montrant qu'il existe une relation entre les raies de He ou He⁺ et celles de la couronne confèrent un intérêt particulier aux recherches relatives au spectre de l'hélium doublement excité. En revanche, la très grande énergie d'excitation nécessaire (environ 60 e. volts, c'est-à-dire à environ 170 Angströms) peut paraître assez difficile à concevoir. En tout cas, il serait intéressant d'effectuer les calculs théoriques aussi complets que possible, des longueurs d'onde correspondantes; évidemment, des résultats expérimentaux dans ce domaine seraient encore plus utiles.

Quant à l'oxygène, c'est Hopfield le premier qui, en 1931, crut trouver une coïncidence entre la raie de laboratoire 6374.29 et la raie coronale 6374.51. Il s'agit là seulement d'une coïncidence numérique approchée. Peu après (1932), de Bruin publia qu'on pouvait, en partant d'un niveau inconnu X, calculer trois raies nouvelles de OI en 5302.7, 6704.07 et 6775.9 et en conclut que le coronium n'était que de l'oxygène neutre. Simultanément, Frerichs et Dingle prouvèrent, de deux façons différentes, que ce niveau X était impossible. Au début de 1933, des quotidiens américains et anglais annoncèrent que Boyce et Menzel se croyaient autorisés à attribuer les raies coronales 6374, 3454 et 3987 à OI. Mais Frerichs montra qu'il s'agissait vraisemblablement d'une pure coïncidence numérique. Nous reviendrons encore plus loin à ce problème de l'oxygène neutre.

5. - Étant donné l'importance du problème, il nous a semblé utile d'examiner systématiquement les diverses possibilités physiques d'identification. Celles-ci peuvent être classées en possibilités d'origine atomique, d'origine moléculaire ou encore mi-atomique, mi-moléculaire. Il paraît sans intérêt de considérer de nouveaux types d'édifices atomiques (p. ex. noyau négatif et électrons positifs) ou bien des émissions par particules solides ou encore d'autres mécanismes bizarres parfois rencontrés dans la littérature astronomique.

6. - *Possibilité d'origine atomique.* — Il est bien certain que les raies coronales ne proviennent pas de transitions atomiques permises, mesurées déjà en laboratoire. Mais on pourrait se demander si le soleil ne contient pas un élément non encore bien étudié en laboratoire et qui se manifesterait, dans la couche renversante, par des raies d'absorption non encore identifiées. Nous avons donc pris les raies so-

lares non identifiées, d'intensité Rowland supérieures à 3 et nous avons examiné systématiquement si les différences λ des nombres d'onde de ces raies ne coïncident pas avec des différences λ de raies coronales (ce qui signifierait que deux raies solaires et deux raies coronales auraient un couple de niveaux communs). Trois coïncidences se présentent, mais ne résistent pas à un examen approfondi, c'est-à-dire ne vérifient pas les critères exposés au n° 3.

On peut ensuite penser aux transitions interdites à partir d'états métastables. Tous les éléments dont les niveaux métastables sont connus ont été essayés sans succès. D'ailleurs, on ne peut s'attendre à trouver éventuellement que les atomes dont les niveaux métastables ne peuvent être dépeuplés fortement par absorption du rayonnement solaire, c'est-à-dire seulement ceux dont les raies d'absorption ayant comme niveau inférieur un des états métastables se trouvent dans l'ultraviolet lointain.¹ Il reste quelques atomes qui se trouvent dans ces conditions et dont les termes ne sont pas connus. Le plus important d'entre eux est sans doute Fe III, puisque le fer est un métal de grande abondance cosmique. Nous avons donc, en collaboration avec B. Edlén (1938) essayé de mesurer et classer le spectre compliqué de Fe III. Tout ce qui concerne les transitions permises d'intérêt astronomique est presque terminé, mais il n'en est pas de même des raies interdites. La preuve n'est donc pas encore faite que Fe III n'est pas responsable de certaines raies coronales; mais les résultats provisoires déjà obtenus ne paraissent pas laisser beaucoup de chance à cette possibilité.

Naturellement, de nombreuses coïncidences apparaissent fatalement; mais très peu résistent à un examen sérieux (critères astronomiques et spectroscopiques du n° 3) et celles-là (transitions à partir d'états métastables de Ni II, Sc I, etc....), doivent, selon toute vraisemblance, être attribuées au hasard.

On peut ensuite envisager tous les atomes légers et se demander si le spectre coronal n'est pas dû à des atomes fortement excités (par exemple doublement excités), c'est-à-dire si les raies ne proviennent pas de transitions entre termes spectraux négatifs ou positifs de petite valeur. Diverses raisons poussent à examiner cette hypothèse: 1° Dans les niveaux inférieurs des atomes légers, presque toutes les possibilités théoriques de placement de niveaux sont épuisées; d'ailleurs aucune transition calculée entre ces niveaux connus ne donne de raie coronale. Au contraire, dans les niveaux

¹ On constate immédiatement qu'aucune des raies solaires d'absorption ne coïncide avec une ligne coronale en satisfaisant aux critères spectroscopiques.

² Même ceci n'est pas certain, car le rayonnement ultra-violet lointain du soleil est vraisemblablement beaucoup (1100) fois plus intense que celui d'un corps noir à 6000°. Mais, en revanche, les processus d'excitation électronique du type étudié par K. Wurm pourraient être présents.

supérieurs très excités, il reste beaucoup de possibilités théoriques de niveaux électroniques. 2°) La couronne possède une densité appréciable en électrons rapides; il y a donc des possibilités d'obtenir des niveaux très excités.

Nous avons considéré les atomes légers cosmiquement abondants (carbone, azote et oxygène) dans les états neutres et ionisés :

C I, C II, C III, C IV; N I, N II, N III, N IV; O I, O II, O III, O IV

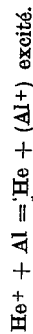
et calculé toutes les différences entre les niveaux connus, y compris les intercombinaisons quand des intercombinaisons ont été observées en laboratoire. Les différences entre termes de parités différentes ont été comparées aux ν coronales et les différences entre termes de même parité ont été comparées aux différences ν des raies coronales.

Dans le premier cas, on ne trouve guère de coïncidence possible sans entraîner la présence théoriquement obligatoire d'autres raies non observées. Dans le second cas, on calcule des niveaux hypothétiques supérieurs (X) ou inférieurs (Y) communs à deux raies coronales. Pour discuter ces niveaux X ou Y, on devra voir d'abord s'ils sont possibles d'après la structure du spectre considéré. Dans l'affirmative, il faudra voir si l'accord des longueurs d'onde est suffisant, étant donné la précision des mesures des raies coronales et des positions des niveaux dans chaque cas particulier. Puis, on devra examiner si les passages de probabilité semblable se présentent; si les intensités sont vraisemblables; et si les critères astronomiques sont vérifiés.

Nous avons procédé à cette discussion qui s'est montrée extrêmement longue, étant donné le nombre considérable de coïncidences. Le cas de O I envisagé précédemment par Boyce et Menzel a été considéré avec un soin particulier, en utilisant le classement en niveaux récemment complété et mis au point par B. Edlén (1938, non publié).

On trouve, pour tous les atomes examinés, de nombreuses coïncidences — parmi lesquelles celle de Boyce-Menzel — qu'il serait trop long de reproduire ici. Après discussion, celles d'entre elles qui subsistent, paraissent bien n'être qu'un effet du hasard.

Nous avons encore considéré tous les effets possibles de chocs entre atomes, avec, par exemple, transformation d'énergie d'ionisation en énergie d'excitation. Exemple :



Il arrive que le bilan d'énergie puisse être obtenu parfaitement; mais alors la chute de l'état excité [dans l'exemple ci-dessus, l'état $7p \text{ } ^1\text{P}_1$ de Al II] vers les niveaux inférieurs ne donne pas de coïncidence satisfaisante! Des mécanismes plus complexes avec état métastable intermédiaire n'ont pas rencontré plus de succès!

Un de nos élèves, Monsieur L. Nysten, L. Sc., continuant nos

ssais, a examiné si l'excitation de fluorescence par les raies ultraviolettes intenses (permisses ou interdites) de H, He I ou He II ne pouvait conduire à des raies coronales; il a retenu tous les atomes d'abondance cosmique suffisante et considéré l'absorption de raies ultra-violettes aussi bien à partir des états métastables qu'à partir de l'état normal. La discussion très laborieuse des coïncidences n'a permis de conserver que quelques rares exemples qui, vraisemblablement, ne sont que des « chances coïncidences ». Un travail analogue a été fait ensuite en partant d'éléments autres que H, He I et He II, moins susceptibles de fournir une excitation notable. Mais le résultat de plusieurs mois d'essais continus a encore été négatif.

Nous avons déjà vu précédemment que les essais en partant de l'effet Raman atomique (Mecke et Wildt) ou des ions négatifs (Goudamit et Wu) n'avaient pas fourni non plus de résultat. Nous avons aussi repris le premier cas (effet Raman atomique) de façon systématique sans obtenir de résultat satisfaisant.

7. - Possibilités d'origine moléculaire ou mixte. Quoique celles-ci soient beaucoup moins vraisemblables, étant donné la faible abondance relative des molécules par rapport aux atomes, on ne peut négliger aucune possibilité d'explication!

Nous avons donc étudié systématiquement, pour toutes les molécules assez abondantes théoriquement (H₂, O₂, C₂, N₂, OH, CH, NH, CO, NO, CN), tous les processus analogues à ceux que nous avons considérés pour les atomes :¹

a) transitions permises, dues à une excitation fluorescente quelconque;

b) effet Raman moléculaire;

c) effets divers de collisions (p. ex. collisions triples; transformation d'énergie de dissociation en énergie d'excitation; etc....).

Etc....

Naturellement, les calculs étaient particulièrement longs, étant donné les grandes possibilités de coïncidence dues aux nombreux niveaux de rotation et de vibration. Il serait oiseux d'entrer dans le détail, puisque le résultat général est négatif!

8. - Que conclure à l'issue de cet examen systématique de toutes les hypothèses physiques ayant quelque vraisemblance? Dn résultat négatif, on serait tenté de conclure à la nécessité d'une idée tout à fait nouvelle — comme celle de Bowen dans le cas de l'énigme du « nebulium ». L'interprétation des raies coronales est incontestablement un des grands et difficiles problèmes astronomiques actuels.

¹ Une partie de la discussion a été effectuée par Monsieur L. Nysten.

