

La fascination des novae

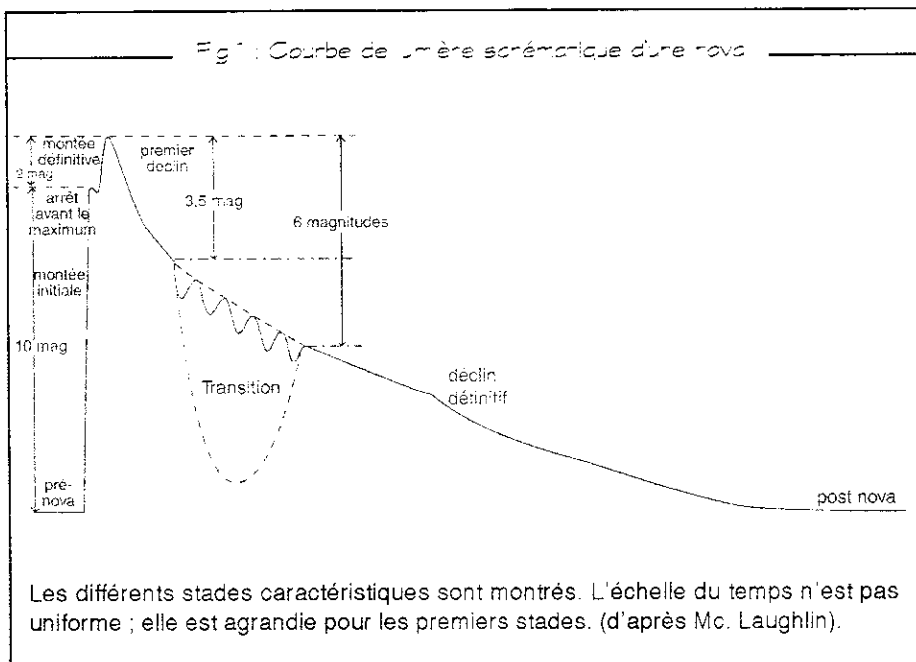
Michael Friedjung, I.A.P., C.N.R.S.

ARTICLE DE FOND

De temps en temps, l'éclat visuel d'une étoile assez faible augmente pendant quelques heures d'un facteur de l'ordre de 10 000 (10 magnitudes) ; après avoir augmenté un peu plus, l'éclat passe par un maximum, avant de diminuer beaucoup plus lentement vers un éclat proche de celui d'avant l'éruption. Il s'agit d'une nova. Elle n'est pas nouvelle (contrairement à ce que son nom indique) mais elle pouvait paraître nouvelle jadis quand les observateurs n'étaient pas en mesure d'observer les étoiles faibles.

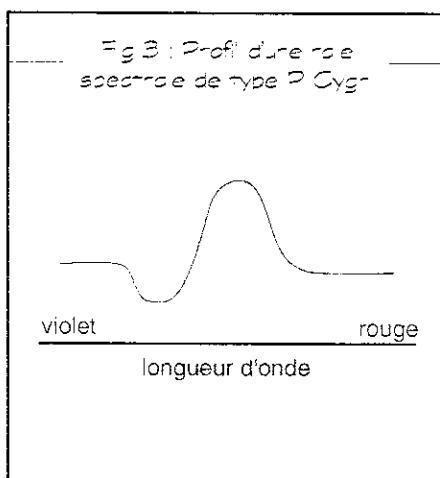
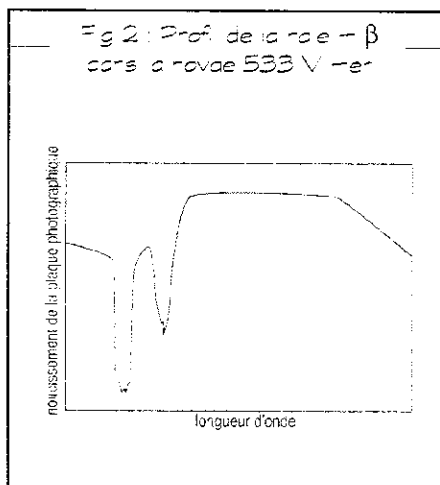
Introduction.

Pendant une éruption, l'éclat d'une nova passe par plusieurs étapes, qui sont montrées d'une façon très schématisique dans la fig.1, d'après Mac Laughlin. Les novae parcourent ces étapes plus ou moins vite ; une nova "rapide" le fait en peu de temps, tandis qu'une nova "lente" a besoin de beaucoup plus de temps pour les parcourir. Des études récentes de la répartition des novae indiquent que dans notre galaxie les novae rapides sont plus concentrées que les lentes dans le plan de cette galaxie.



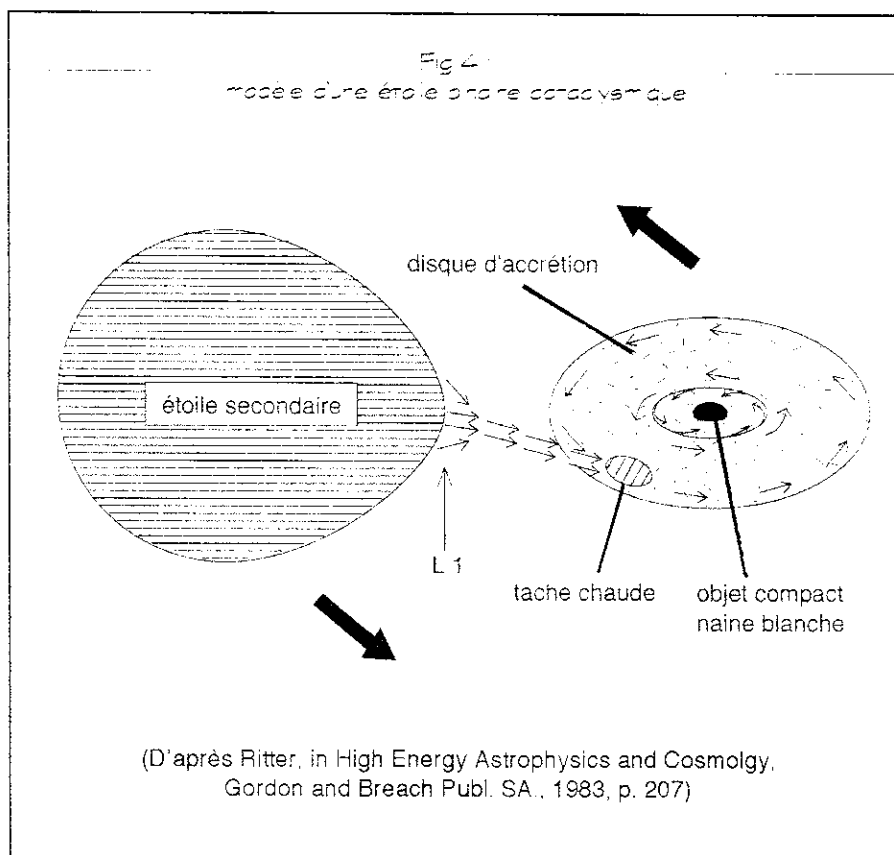
D'autre part, l'examen de la variation avec le temps des spectres d'une nova après le début d'une éruption indique la présence de plusieurs couches en expansion, qui s'éloignent à grande vitesse d'un objet central. On peut tirer cette conclusion à partir de l'analyse des profils complexes des raies spectrales qui contiennent des composantes en absorption et en émission (cf. fig. 2). Un tel profil peut-être compris comme une superposition de plusieurs profils de type "P Cygni" (fig. 3).

Un profil de ce type est produit par une couche sphérique en expansion autour d'une "photosphère" qui émet un spectre continu. Chaque région de la couche émet et absorbe dans une raie spectrale qui est déplacée à cause de l'effet Doppler¹. Les émissions dans cette raie par toutes les régions de la couche, lesquelles ont des déplacements donc des vitesses différents, provoquent un élargissement Doppler de la raie. D'autre part, les parties des couches surmontant la photosphère provoquent une raie d'absorption ; mais cette dernière est déplacée par effet Doppler vers des longueurs d'onde plus courtes que la longueur d'onde naturelle car cette couche s'approche de l'observateur. C'est pour cette raison qu'une composante de la raie en absorption paraît déplacée vers le bleu et du côté bleu de l'émission. L'effet combiné de l'émission et de l'absorption d'une raie produite par une couche sphérique qui a une certaine vitesse d'expansion est un profil de type P Cygni. Quand il y a occurrence de plusieurs profils P Cygni, on peut donc supposer que ce profil global est produit par des couches différentes ayant des vitesses d'expansion différentes.



Pendant le développement du spectre d'une nova après l'éruption, les composantes en absorption des raies disparaissent et le spectre commence à ressembler à celui d'une nébuleuse. Longtemps après cette éruption on peut, si la nova n'est pas trop éloignée, voir une petite nébuleuse en expansion, dont on suppose qu'elle a été éjectée à cause de cette éruption. La nébuleuse a souvent une structure complexe avec des calottes polaires et des anneaux. Elle faiblit avec le temps ; ce qui reste est un objet central.

Tous les spécialistes pensent que l'objet central est une étoile binaire, de la classe des "binaires cataclysmiques". Une binaire de cette classe est formée de deux étoiles en interaction gravitationnelle, se mouvant l'une autour de l'autre ; l'une des deux composantes est une étoile assez froide, qui a normalement les propriétés d'une étoile de la série principale ou des propriétés semblables à celles d'une telle étoile, l'autre composante est une naine blanche.



La première de ces deux étoiles est un peu trop grande pour ne pas perdre, au profit de son compagnon, la masse située près de sa surface ; ce phénomène est dû à l'attraction gravitationnelle de ce compagnon et à la force centrifuge produite par le mouvement orbital. Dans cette situation, la masse fuit par le point intérieur de Lagrange. Cette masse perdue doit encore perdre beaucoup de son moment cinétique avant d'être capturée, c'est à dire "accrétée" par le compagnon. Une telle prise peut se produire si la masse perdue tombe dans un "disque d'accrétion" autour de la naine blanche, dont la viscosité transporte le moment cinétique vers l'extérieur (cf. fig. 4). Il y a beaucoup d'indications de la présence de tels disques pour les binaires cataclysmiques si la naine blanche n'a pas un champ magnétique qui désagrège le disque ou au moins les régions intérieures du disque.

Plusieurs autres sortes d'objets sont classées binaires cataclysmiques. Par exemple, les "novae naines" ont de temps en temps des éruptions de quelques magnitudes, que les spécialistes expliquent par des instabilités du disque d'accrétion. La durée entre deux de ces éruptions successives est typiquement de l'ordre de quelques semaines ou quelques mois.

Il y a d'autres binaires cataclysmiques pour lesquelles on n'observe pas d'éruptions semblables à celles des novae naines ; ce sont peut-être, dans certains cas, les objets centraux des novae longtemps après leur éruption.

Les spécialistes pensent qu'une éruption violente de nova est due à une explosion thermonucléaire de l'hydrogène accrété par la naine blanche. Il y a eu beaucoup de travaux, depuis les années 70, sur les mécanismes de ce genre d'explosion qui doit se produire selon les théories actuelles. On prédit que la masse éjectée lors d'une éruption de nova est de l'ordre de celle accrétée auparavant (elle peut d'ailleurs être plus grande) ; après une telle éruption, l'accrétion doit reprendre et déboucher sur une autre éruption après une durée d'au moins plusieurs millénaires.

Pour certaines novae, dites "novae récurrentes", cette durée n'est que de l'ordre de quelques décennies ; les propriétés de ces objets ou du moins de certains d'entre eux sont assez différentes de celles des novae "classiques".

Nous devons néanmoins souligner que beaucoup des aspects "détaillés" des novae sont encore très mal compris, malgré l'accord des spécialistes sur ce qui a été exposé jusqu'ici dans cette introduction. Les spécialistes se battent entre eux sur ces aspects, tandis que souvent les théoriciens ne tiennent pas compte des observations "rebelles" difficiles à expliquer. Nous allons maintenant nous occuper de ces détails.

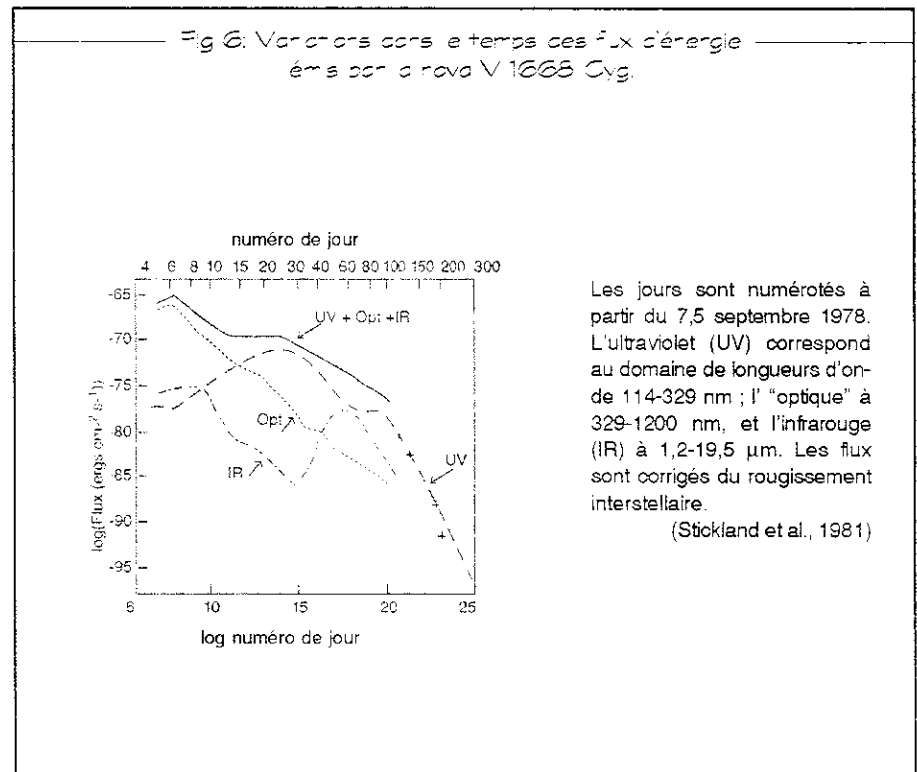
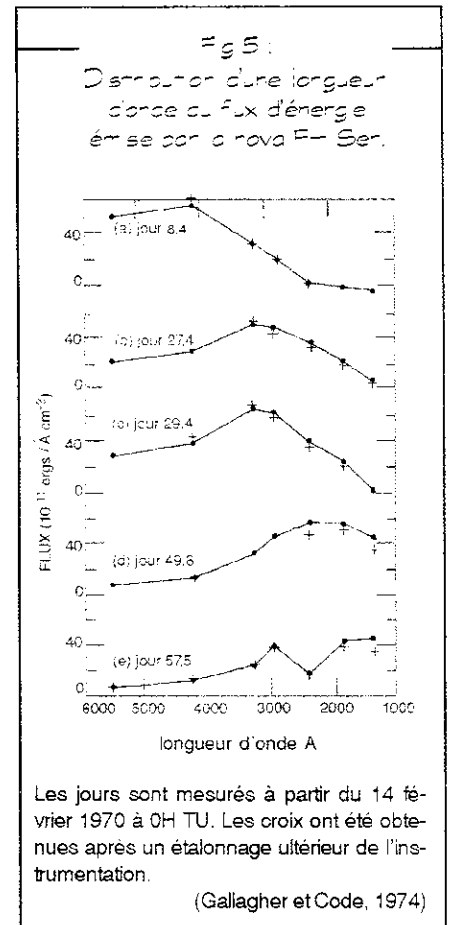
Ce que l'on peut déduire des observations d'une éruption.

Aujourd'hui on observe le rayonnement électromagnétique des novae du domaine radio jusqu'au domaine des rayons X et on espère d'ailleurs pouvoir aussi observer leur rayonnement γ . C'est de cette façon que l'on peut com-

prendre nettement mieux les processus physiques que lorsque les astronomes n'avaient à leur disposition que des observations dans le domaine optique.

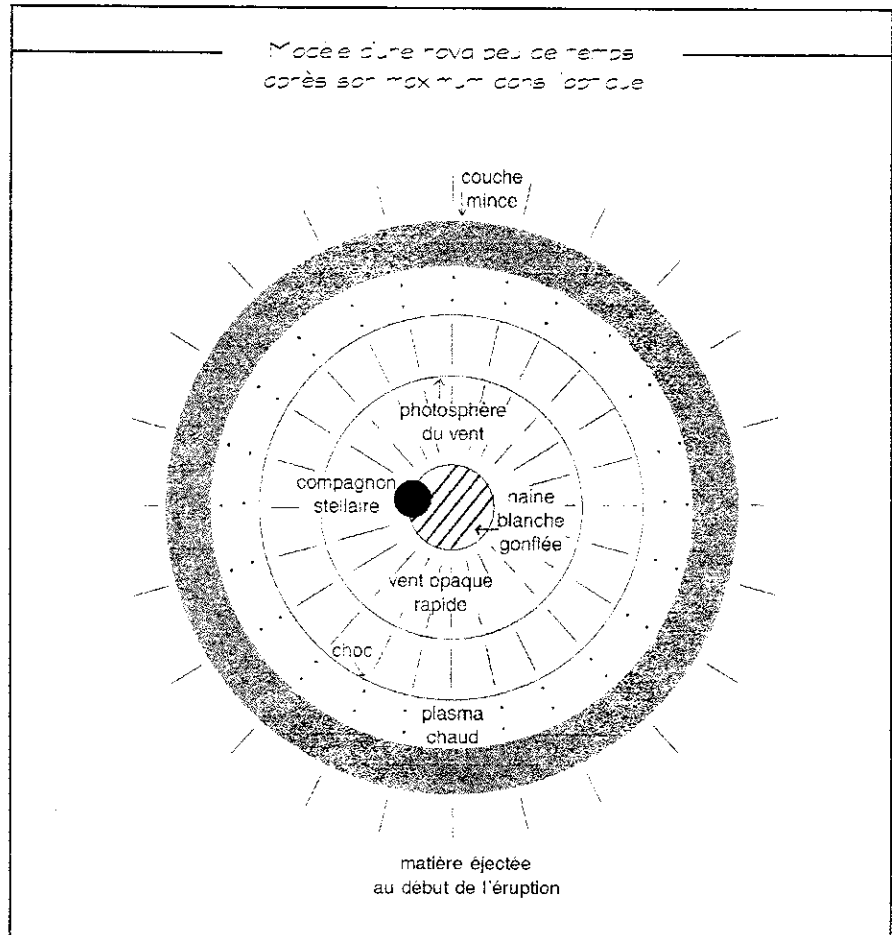
On a ainsi découvert que, après le maximum optique², la luminosité totale diminue beaucoup plus lentement que la luminosité optique seule. Pendant cette évolution la plus grande partie du rayonnement est émise à des longueurs d'onde de plus en plus courtes ; la longueur d'onde de l'émission maximum se déplace du domaine optique à l'ultra-violet puis au domaine des rayons X mous.

La fig. 5 montre ce déplacement observé pour la nova FH Serpentis (1970) tandis que la fig. 6 montre la variation avec le temps des flux de longueur d'onde différentes de la nova V1668 Cyg (1978). L'émission X n'a pas été mesurée pour celle-ci ; si on avait pu en tenir compte dans le calcul du flux total, on aurait vraisemblablement observé une diminution encore plus lente du flux total que celle montrée dans la figure.



Le flux total d'une nova paraît être proche, et peut-être à certaines époques au dessus, d'une limite appelée "limite d'Eddington". Quand la luminosité d'une étoile dépasse cette limite, sa pression de radiation est plus grande que l'effet de l'attraction universelle et l'étoile a tendance à se désagréger. Le flux total est moins grand plusieurs décennies après le début d'une éruption ; néanmoins, la nova GQ Mus (1983) est restée très lumineuse pendant presque une décennie, comme on a pu le constater à partir des observations faites en rayons X à partir du satellite ROSAT. On peut comprendre au moins de façon approximative ce qui se passe, à partir des observations de FH Ser, qui était bien observée à des longueurs d'onde différentes. La répartition spectrale d'énergie émise à des longueurs d'onde différentes était assez proche de celle d'un corps noir sur un grand domaine de longueur d'onde pendant quelques semaines après le maximum en lumière optique. Ce fait indique presque sûrement que le rayonnement observé était émis à partir d'une surface opaque et chaude, c'est à dire d'une "photosphère". Ce raisonnement est critiqué par certains collègues pour des raisons théoriques. Cette photosphère est devenue de plus en plus chaude après le maximum optique. D'autre part, quand on calcule la variation dans le temps du rayon de la photosphère de FH Ser à partir de la loi d'émission des corps noirs, on trouve que le rayon est devenu de plus en plus petit.

Si nous voulons savoir quelle est la nature de la photosphère d'une nova après le maximum optique, nous devons nous pencher sur les observations spectroscopiques. Comme nous l'avons vu, les profils des raies sont des superpositions des profils produits dans des couches en expansion qui ont des vitesses différentes (gardons quand même en mémoire que nous supposons en première approximation que cette dispersion des vitesses a une symétrie sphérique). D'autre part il est faux que toutes les raies spectrales soient émises et absorbées dans chacune des couches; les raies des atomes les plus ionisés sont normalement produites seulement par les couches dont la vitesse d'expansion est la plus élevée. Cela veut dire que les conditions physiques des différentes couches ne sont pas les mêmes.



Une étude détaillée montre que les régions observables ayant les vitesses d'expansion les plus grandes se trouvent dans les couches les plus profondes des régions transparentes, qui peuvent être observées autour de la photosphère. Ces couches qui ont une grande vitesse sont aussi près de cette photosphère opaque. Cela signifie que cette photosphère, contrairement à celle des étoiles plus "normales", se trouve dans un milieu en expansion rapide. Si on poursuit ce raisonnement jusqu'au bout, on en déduit que l'on peut être presque sûr que ce qui se passe est l'éjection continue d'un vent opaque.

Néanmoins tous les chercheurs dans ce domaine ne sont pas d'accord : certains pensent qu'on ne voit qu'un vent transparent au-dessus de la photosphère presque stationnaire d'une naine blanche gonflée, pendant certains des premiers stades du développement de la nova après son maximum optique. Leur point de vue est, à mon avis, difficile à défendre.

Avant le maximum optique, la situation semble être différente. Les observations de plusieurs novae font penser que pendant ce stade les couches ayant les vitesses les plus élevées sont les plus éloignées du centre de l'enveloppe éjectée. Un tel gradient de vitesses pourrait être dû à un choc, produit par une explosion au début de l'éruption. Les parties les plus intérieures de cette enveloppe semblent avoir des vitesses plus petites que celles du vent ; on peut s'attendre à ce qu'elles soient balayées par le vent. Le résultat devrait être la production d'une couche mince, qui contient vers la fin de ce processus, la plupart, ou du moins une forte proportion, de la masse totale éjectée et du plasma chaud. D'un point de vue observationnel, il y a des indications de la présence d'une telle couche mince, tandis que le choc entre le vent et la matière éjectée pourrait produire les émissions X dures des novae observées. Néanmoins, il est difficile d'expliquer la présence de toutes les "couches" qui sont indiquées par les profils des raies spectrales ; certaines pourraient être des nuages nés à la suite d'instabilités provoquées par des collisions entre masses de vitesses différentes dans l'enveloppe éjectée.

Un autre aspect des éruptions est ce que semble être la condensation de poussières dans la masse éjectée de certaines novae. La présence de ces poussières est indiquée par des excès infrarouges, expliqués par l'absorption du rayonnement de courte longueur d'onde par les poussières et sa réémission dans l'infrarouge. L'apparition soudaine de cette absorption explique d'autre part la forme de certaines courbes de lumière des novae qui montrent des baisses soudaines de luminosité optique.

Quand le spectre devient semblable à celui d'une nébuleuse, on peut mesurer les abondances relatives des éléments dans la masse éjectée, surtout si on utilise à la fois des observations optiques et ultraviolettes. Ces abondances relatives ne sont pas les mêmes pour chaque nova ; elles sont souvent très différentes de celles du Soleil. Des surabondances modestes d'hélium sont observées tandis que l'on observe de grandes surabondances de carbone, d'azote et d'oxygène. Quelquefois, on observe des surabondances de néon et de magnésium, dont les atomes sont plus lourds. Bien que le fait que la condensation des poussières puisse enlever certains des éléments du plasma étudié par des méthodes spectroscopiques, la plupart des anomalies en abondance semble être caractéristique de toute la masse éjectée.

Les novae longtemps après l'éruption.

Les novae sont moins spectaculaires et peut-être plus faciles à comprendre longtemps après l'éruption mais certaines questions demeurent.

La lumière de la plupart des novae faiblit pendant des années ; la vitesse d'affaiblissement plusieurs décennies après l'éruption semble être plus grande, quand la période orbitale de l'étoile binaire est plus petite. Pendant ce stade, quelques novae ont de petites éruptions, qui sont peut-être semblables à celles des novae naines. D'autre part, une nova paraît être moins brillante quand le plan de l'orbite est peu incliné par rapport à la ligne de visée que si l'inclinaison de ce plan est grande.

Ceci peut-être expliqué par le fait que le disque d'accrétion (qui devrait émettre la plupart de la lumière du système binaire) paraît moins brillant

quand il est vu par la tranche que quand il est vu de face.

Il faut aussi mentionner que sa luminosité intégrée sur toutes les directions est plus grande que celles de novae naines aux stades où elles n'ont pas d'éruption. Si les novae continuent à faiblir après l'éruption il est possible qu'elles deviennent des novae naines. Selon certaines conceptions, elles pourraient devenir très faibles et difficiles à observer à un stade plus avancé. On ne sait pas clairement si les observations soutiennent ou non cette conception.

D'autres effets sont aussi présents. Une nova peut être aussi trop faible à cause de la désagrégation du disque d'accrétion par un fort champ magnétique. D'autre part, la luminosité de la vieille nova HR Del (1967) semble être trop élevée ; ce fait pourrait indiquer une forme "d'activité" de la naine blanche qui continue encore.

Modèles et théories des novae

Il n'est pas facile de faire un modèle qui tienne compte de toutes les observations de novae pendant leurs éruptions. On peut comprendre la nature du vent éjecté d'une façon continue dont la présence est indiquée par les observations s'il est accéléré par la pression de radiation. Ce vent semble être opaque et des estimations approximatives de la pression de radiation indiquent que la plupart de l'accélération se produit à de grandes profondeurs sous la photosphère, où il est très opaque. Un tel vent a des propriétés très différentes de celui d'une étoile chaude "normale" : pour une telle étoile, le vent, accéléré au-dessus de la photosphère, est transparent sauf pour le rayonnement dans certaines raies spectrales. On croit que les vents de ces étoiles "normales" sont accélérés par la pression de radiation dans ces raies. Les novae doivent avoir une luminosité proche de ou au-dessus de la limite d'Eddington, afin de pouvoir accélérer leurs vents denses. Ce genre de situation n'est pas facile à comprendre d'un point de vue physique. La valeur exacte de cette limite dépend de la quantité de rayonnement absorbé par unité de masse des couches de l'étoile et du vent. Des nouveaux calculs de collègues japonais, tenant compte de nou-

velles données sur l'absorption, indiquent que la luminosité d'une nova dépasse la limite d'Eddington seulement localement après le maximum optique, et que ce phénomène doit produire un vent qui est vraiment opaque. Cependant ces calculs japonais sont très critiqués ; il faudra les faire à l'avenir d'une façon plus rigoureuse.

Le fait que les novae continuent à faiblir plus vite longtemps après l'éruption quand la période orbitale est plus petite, pourrait être expliqué par un chauffage plus fort de la composante froide de la binaire par le rayonnement qui lui tombe dessus à la suite de l'explosion de la composante naine blanche (on peut voir, à partir de la troisième loi de Kepler que quand la période est plus courte la séparation des composantes est plus petite). Ces couches ainsi chauffées perdraient plus de masse au profit de la naine blanche et le disque d'accrétion serait plus lumineux. La composante froide d'une binaire de période courte devrait par la suite refroidir davantage à cause de cet effet ; ainsi donc la nova devrait faiblir davantage et plus vite.

Nous pouvons dire en conclusion que bien des aspects des novae sont mal compris. Beaucoup reste à faire, surtout si on veut comprendre les novae réelles et pas seulement certains modèles simplifiés, à partir desquels les théoriciens font souvent des calculs très compliqués.

Notes :

1 - L'effet Doppler produit une augmentation de la longueur d'onde observée de la lumière en provenance des régions qui s'éloignent de l'observateur, c'est à dire qu'une raie émise par une telle région est décalée vers le rouge. De même, la même raie émise par une région qui s'approche est vue décalée vers le bleu.

2 - Le qualificatif "optique" est utilisé ici pour caractériser le domaine visible du spectre. ■