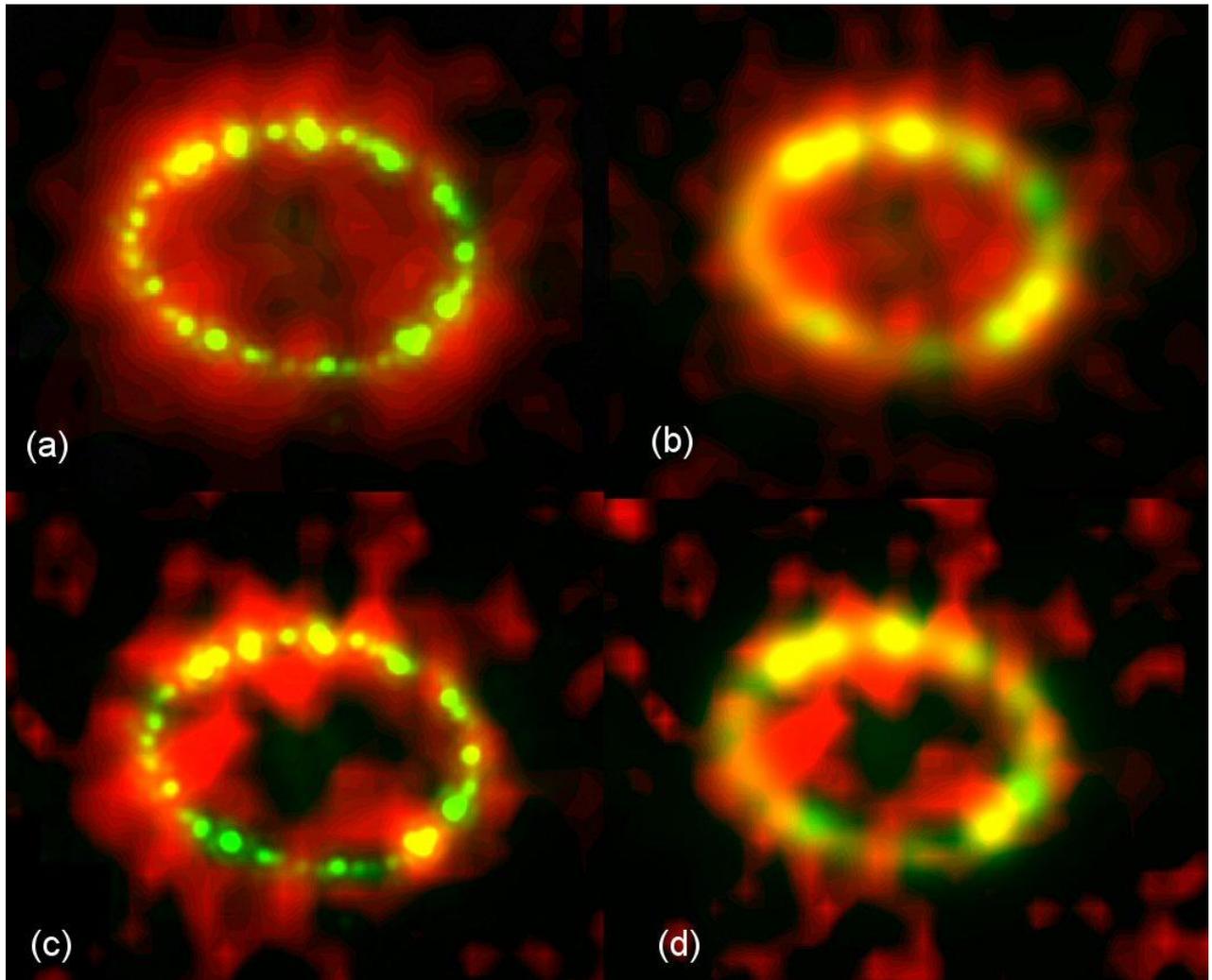


Atelier Fil Rouge du Lundi 10 août 2009

**Etude des Poussières dans l'environnement de la
Supernova SN 1987A**



Patrice Bouchet

XIX^{ème} Festival d'Astronomie de Fleurance

8 – 14 août 2009

La Supernova SN 1987A

La supernova SN 1987A qui a explosé dans le Grand Nuage de Magellan le 23 février 1987 fut la plus brillante, et la seule visible à l'œil nu, depuis celles de Tycho en 1572, et de Kepler en 1604. Peu d'évènements dans l'astronomie moderne ont reçu autant d'attention des scientifiques, et cet objet est toujours actuellement intensément observé et étudié. SN 1987A s'est convertie en une mine d'or pour l'astrophysique et a déclenché un véritable regain d'intérêt pour les études de supernovae de tous les types. Elle a été observée, et continue à l'être, dans toutes les longueurs d'onde, des rayons gamma et neutrinos aux ondes radio. Ce fut la première supernova de type II observée dans une galaxie irrégulière, la première aussi dont l'étoile mère put être identifiée (et qui s'est avérée être une géante bleue, ce qui n'était pas dans les manuels scolaires !), la première dont l'émission de neutrinos, indiquant l'effondrement du cœur, a été observée (ce qui a marqué l'avènement de l'astrophysique des neutrinos), la première à être détectée dans les rayons gamma, et aussi **la première a fournir la preuve que des poussières pouvaient être condensées dans l'éjecta peu de temps après l'explosion**. Ce qui a une importance considérable en regard du problème de l'origine des poussières dans les galaxies primordiales.

Nous allons, dans cet atelier, nous pencher sur les observations qui ont permis de mettre en évidence la présence de poussières dans l'éjecta, et tâcher d'en refaire sommairement l'interprétation (ref. Bouchet, P. et al., 2004 : The Astrophysical Journal, 611 :394-398 ; Bouchet, P. et al., 2006, The Astrophysical Journal, 650 :212 – 227)

Evolution de la Distribution Spectrale d'Energie

Les observations photométriques montrèrent très tôt un excès d'énergie dans la partie infrarouge du spectre. Mais il était impossible de déterminer si cet excès provenait de la supernova ou de son environnement. Deux ans après

l'explosion plus de 90% de l'énergie totale (UVOIR, ou bolométrique) émise par la supernova était rayonnée dans l'infrarouge.

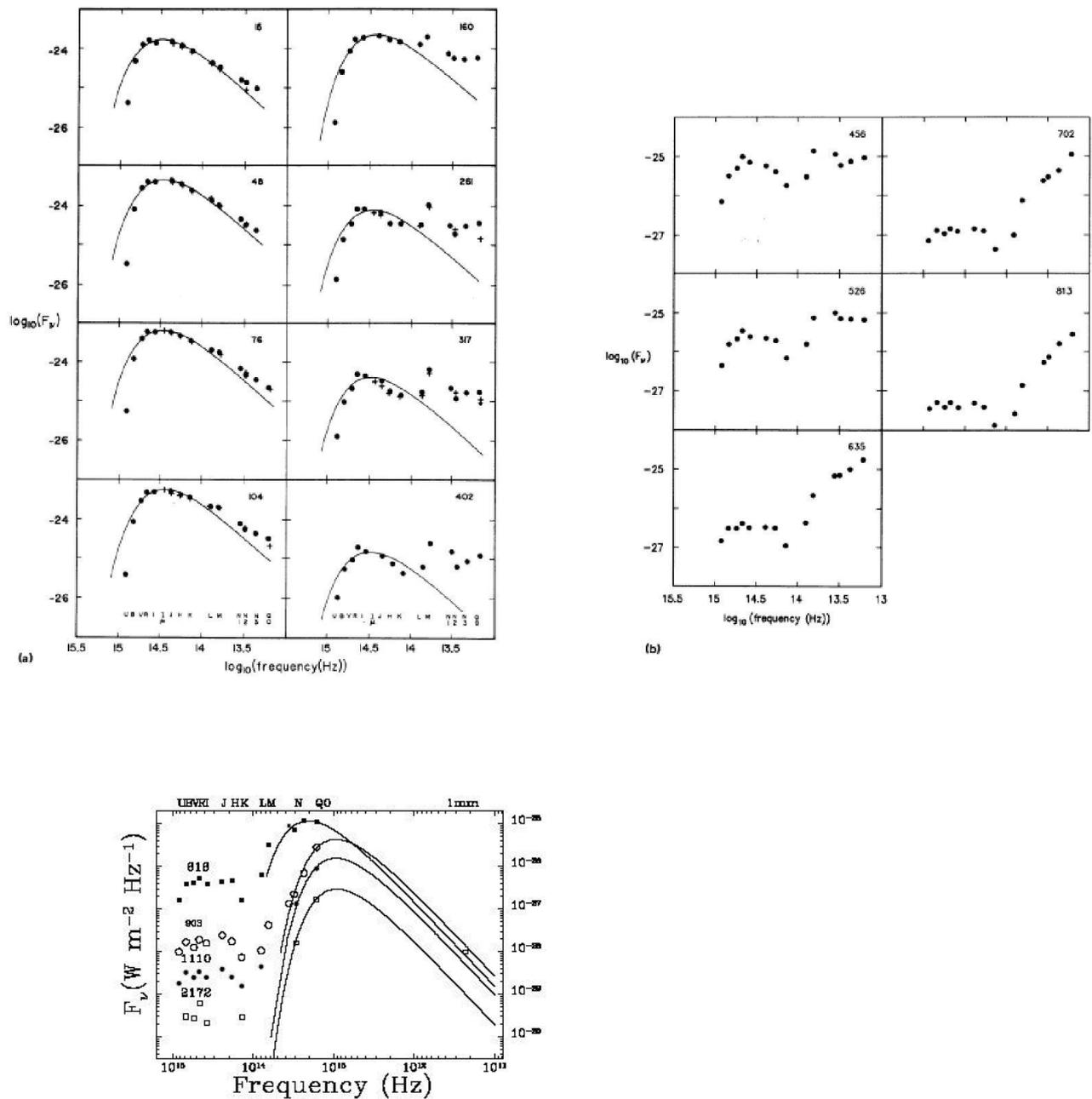


Figure 2: SN1987A: evolution of the SED from days 616 to 2172 after outburst. After day 616 the flux in the mid-IR decreases and the dust gets cooler (Bouchet et al., 1991)

La SED (*Spectral Energy Distribution*) montra très vite que l'excès d'énergie se comportait en première approximation comme un corps noir, dont la température se refroidissait jusqu'à se stabiliser après environ 1100 jours. Ce qui semblait indiquer qu'il provenait de poussières. Mais ces poussières pouvaient avoir été distribuées autour de l'étoile avant qu'elle n'explose.

Environ 500 jours après l'explosion, les raies en émission de certains éléments provenant sans ambiguïté des débris de SN 1987A (OI, Cl, Na I, H α) exhibèrent un profil caractérisé par un **décalage vers le bleu** de leur maximum. En fait, ce décalage n'est qu'apparent car il est produit par une extinction de la partie rouge de la raie. C'est un phénomène connu dans les novae qui s'explique par le fait que les poussières absorbent davantage la partie du rayonnement qui s'éloigne de nous que celle qui se rapproche (« derrière l'étoile »). Cette observation indiquait que **des poussières s'étaient condensées dans l'éjecta**, après l'explosion. C'était la première fois que l'hypothèse que des supernovae pouvaient fabriquer des poussières était confirmée par l'observation. Ceci a des répercussions sur la cosmologie (galaxies très lointaines très riches en poussières).

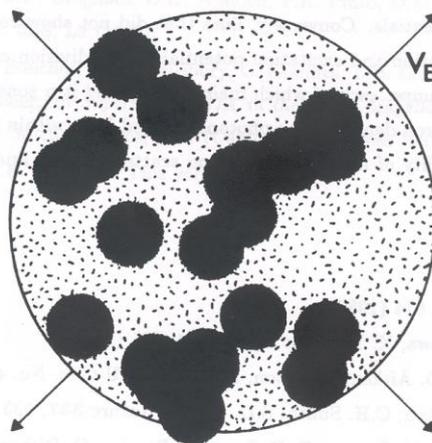
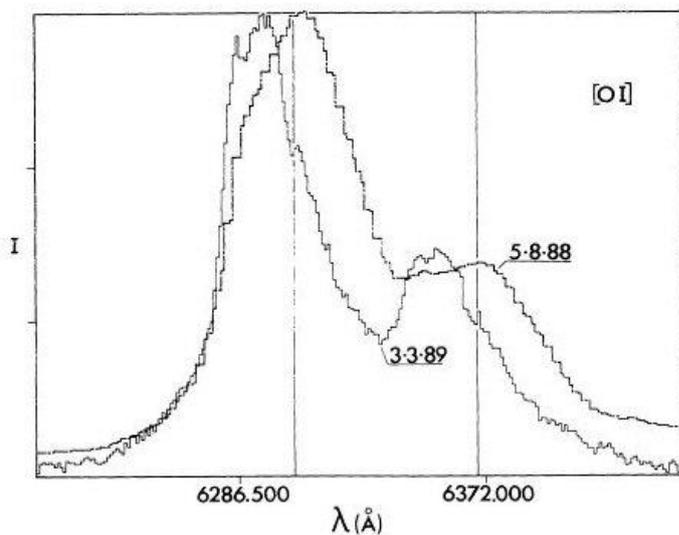
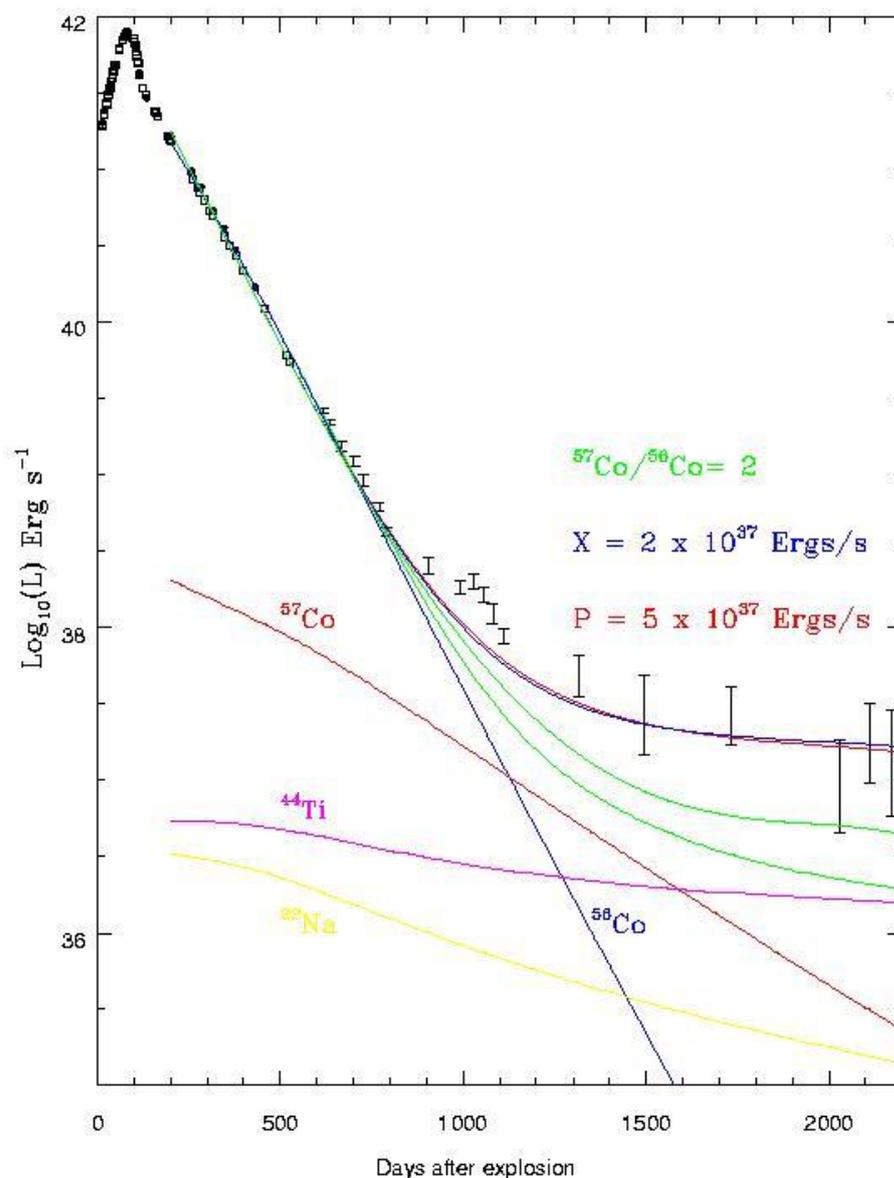
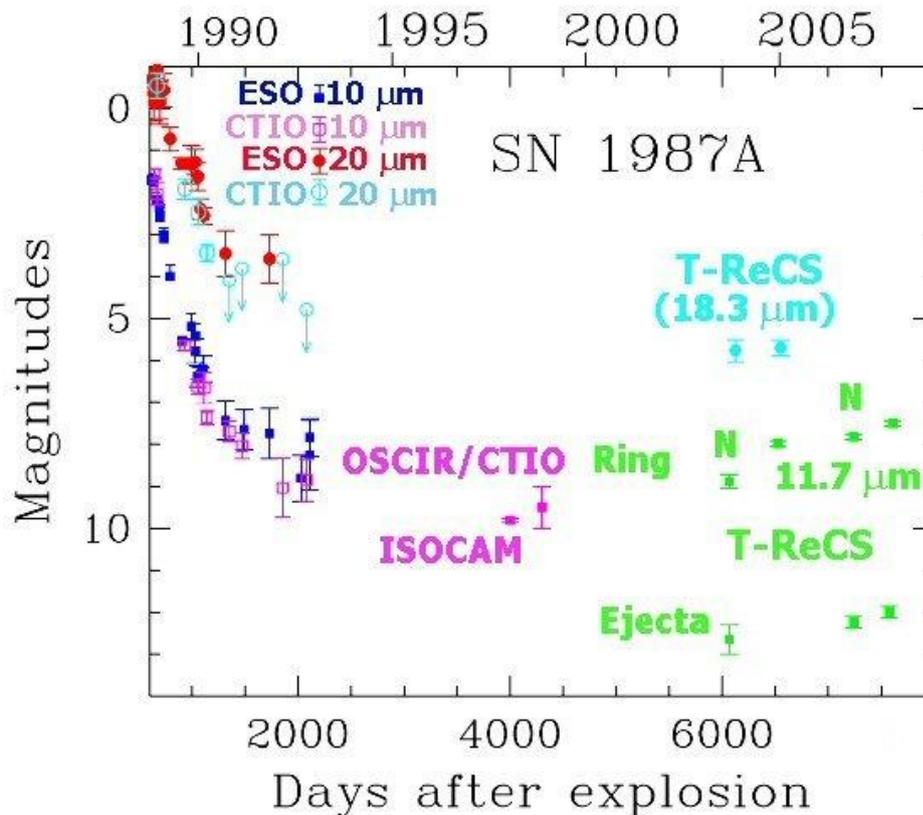


Fig. 7. Opaque clouds - diffuse dust model. Here the number of clouds $n = 20$ and have radii such that $\tau_c = 0.4$.

Un modèle théorique fut construit à partir des observations spectroscopiques : les poussières seraient composées principalement de silicates, et seraient principalement réparties dans des "paquets" très denses et donc très opaques, distribués dans un milieu beaucoup plus diffus. Ces poussières absorbent une partie du rayonnement de la supernova, et ce faisant se réchauffent, et par conséquent réémettent ce rayonnement dans l'infrarouge. Ainsi, le bilan énergétique est conservé : ce qui est absorbé dans le visible est émis dans l'infrarouge. **C'est pour cela que la courbe de luminosité bolométrique ne montre aucun effet dû à la présence de poussières.**

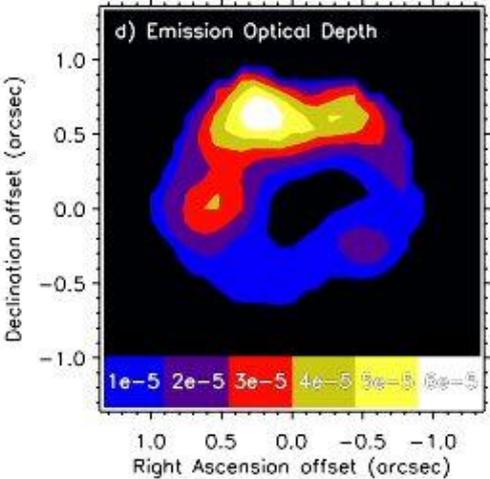
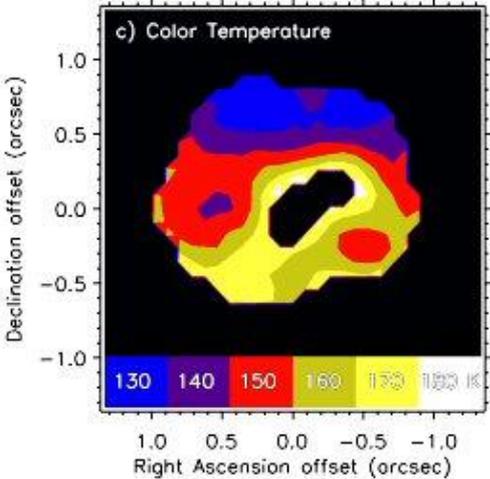
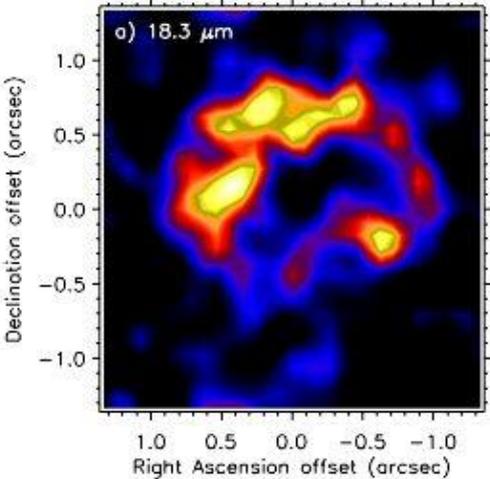
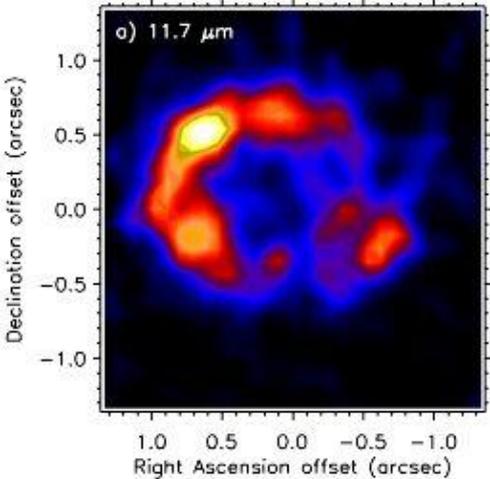
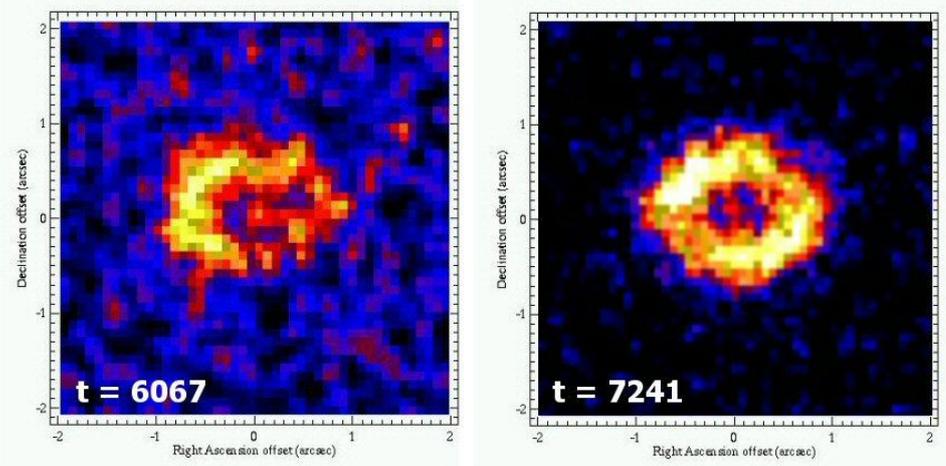


La courbe de luminosité bolométrique reproduit exactement les mécanismes de désintégrations radioactives du Fer en Nickel, puis du Nickel en Cobalt, puis du Titane et enfin du sodium jusqu'au jour 800 environ après l'explosion. **Ce fut une confirmation éclatante de la théorie.** Toutefois après cette date, la courbe s'aplatit. La présence d'un pulsar ou l'existence d'un mécanisme d'accrétion sur l'étoile à neutrons furent évoquées, mais il ne s'agissait en fait que du fait que de l'énergie qui avait été stockée préalablement était libérée tardivement.

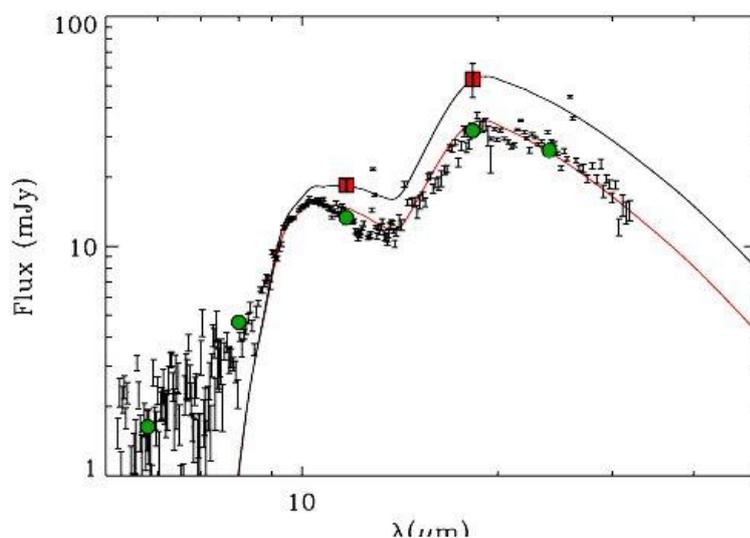
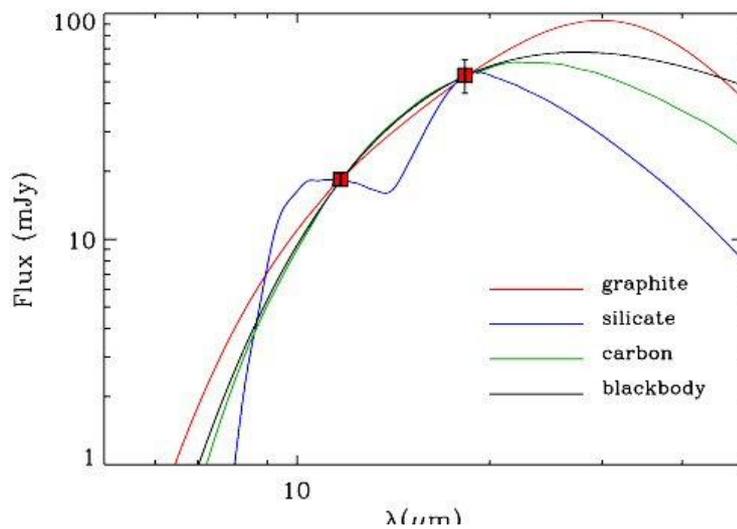


Les courbes de lumières photométriques montraient le même effet "d'aplatissement". Hélas, environ 2000 jours après l'explosion, le rayonnement de la supernova dans l'infrarouge était devenu trop faible pour pouvoir être observé depuis le sol (TIMMI2 à l'ESO, OSCIR à CTIO/NOAO). Il n'y a plus eu de mesures jusqu'à celle effectuée au jour 4100 par le satellite infrarouge ISO (de l'ESA). Mais le système triple d'anneaux dans l'environnement de SN 1987A avait alors été observé (Février 94) et il était alors difficile avec la résolution angulaire d'ISO de savoir ce qui était mesuré. Il fallu attendre l'avènement d'instruments fonctionnant dans l'infrarouge moyen aux très grands télescopes (**VISIR au VLT et T-ReCS à Gemini**) pour pouvoir mesurer distinctement

l'émission infrarouge de l'environnement et celle de l'éjecta. L'émission infrarouge de l'anneau est causée par des poussières préexistantes autour de l'étoile mère, qui ont été chauffées par l'onde de choc de la supernova.



Ce n'est qu'au jour 6067 que les premières images de SN 1987A dans l'infrarouge moyen ont pu être obtenues. Ces observations ont été effectuées avec l'instrument T-ReCS installé au télescope de 8m de Gemini. Deux filtres ont été utilisés : l'un centré à $10.36\mu\text{m}$ ($\Delta = 7.70 - 12.97 \mu\text{m}$) appelé traditionnellement N, et l'autre centré à $18.3\mu\text{m}$ ($\Delta = 17.57 - 19.08 \mu\text{m}$) appelé Q₂. Ces deux filtres seuls ne permettent pas de préciser la composition chimique des poussières, laquelle, comme l'indique la figure ci-dessous, peut être à base de silicates, de graphites, ou de carbone. A noter que la courbe du corps noir se distingue des courbes représentatives de chacune de ces compositions. Mais les spectres fournis par le satellite SPITZER en 2007 et 2008 confirment qu'il s'agit bien de silicates (image du bas).



On se propose dans cet atelier d'interpréter les observations effectuées le 4 Octobre 2003 avec T-ReCS (Gemini Sud).

Les mesures donnent des densités de flux de (1 Jansky = 1 Jy = 10^{-26} W m⁻² Hz⁻¹ (SI) = 10^{-23} erg s⁻¹ cm⁻² Hz⁻¹(cgs)) :

Filtre N : $F_\nu = 9.9 \pm 1.5$ mJy pour l'anneau et $F_\nu = 0.32 \pm 0.1$ mJy pour l'éjecta

Filtre Q₂ : $F_\nu = 50.6 \pm 6.6$ mJy pour l'anneau et pas de détection de l'éjecta.

1. En assimilant le rayonnement des poussières à celui d'un corps noir, déterminer la valeur approximative moyenne de la température des poussières dans l'anneau. On rappelle que :

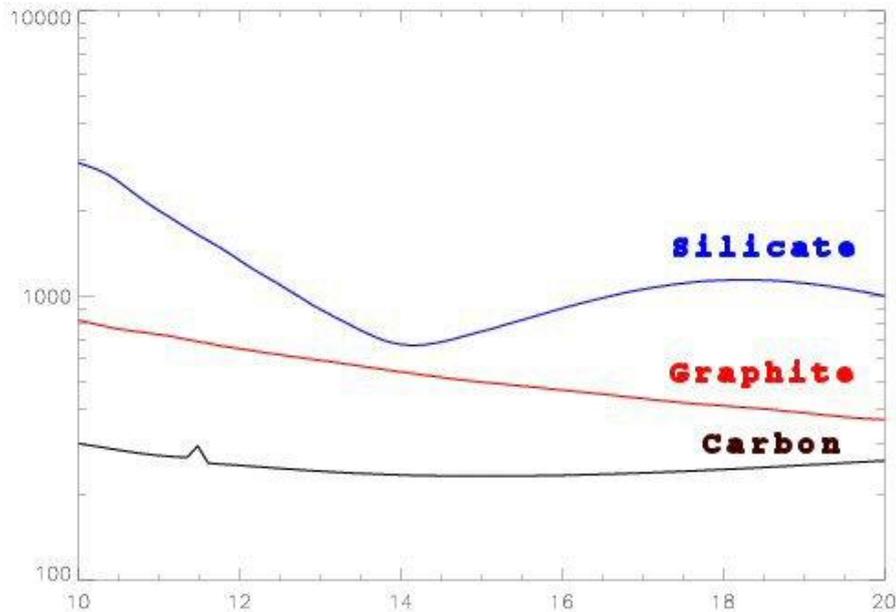
$$B_\nu(T) = \frac{2hc^{-2}\nu^3}{\exp \frac{h\nu}{k_B T} - 1} \quad B_\lambda(T) = \frac{2hc^2\lambda^{-5}}{\exp \frac{hc}{\lambda k_B T} - 1}$$

2. La limite de détection dans le filtre Q2 est 41 mJy, et les observations semblent indiquer que le flux dans le filtre Q2 provenant de l'éjecta est proche de cette limite. D'autre part, il est raisonnable de supposer que la luminosité bolométrique ne résulte que de la radioactivité. En déduire une estimation de la température des poussières qui ont été condensées dans l'éjecta.
3. Si D est la distance de la supernova, $F_\nu(\lambda)$ la densité de flux observée dans le filtre centré sur λ , $\kappa(\lambda)$ le coefficient massique d'absorption des poussières, et $\pi B_\nu(\lambda, T)$ la fonction de Planck, une estimation de la masse des poussières peut être donnée par la formule :

$$M_{\text{poussières}} = \pi D^2 F_\nu(\lambda) / \kappa(\lambda) \pi B_\nu(\lambda, T)$$

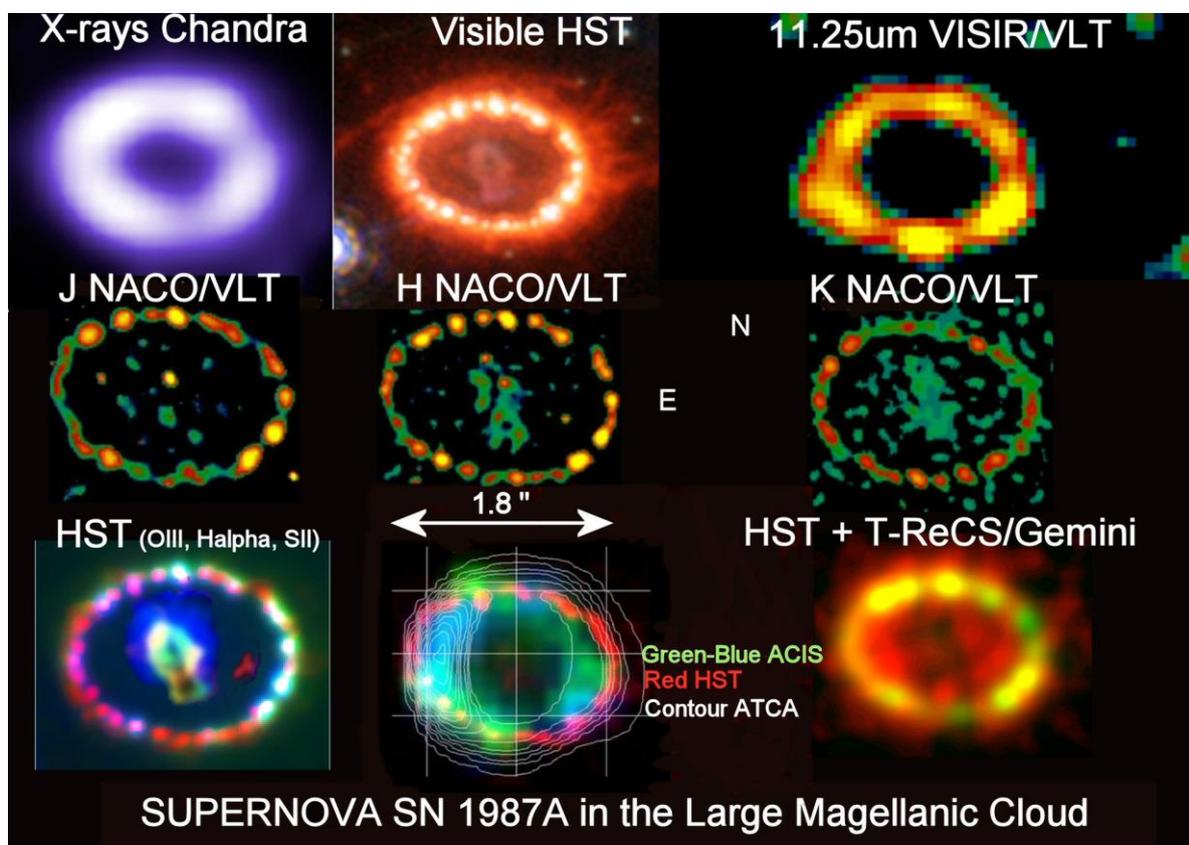
A l'aide du graphique ci-dessous donnant les valeurs de $\kappa(\lambda)$ (en cm² g⁻¹) pour chaque composition possible des grains, en fonction de la longueur d'onde, calculer la masse des poussières dans l'anneau (voir spectres

obtenus par le satellite Spitzer), et les valeurs extrêmes possibles de celles qui ont condensé dans l'éjecta, dont il n'existe pas (encore) de spectre permettant l'étude de leur composition chimique. On prendra la distance du Grand Nuage de Magellan $D = 51.4$ Kpc.



On peut estimer la masse de notre Galaxie $M \approx 5 \cdot 10^{10} M_{\odot}$, de laquelle environ 5% est du gaz, et qu'il y a 1% de poussières dans le gaz. Vérifier que la masse de poussières dans notre Galaxie est d'environ $M_{\text{Poussières}} \approx 25 \cdot 10^6 M_{\odot}$. D'autre part les modèles d'évolution chimique de la Galaxie requièrent qu'il y a eu environ $3 \cdot 10^8$ supernovae (du type de celles qui nous intéressent ici, appelées des supernovae par effondrement du cœur) depuis sa formation.

4. Que vous inspirent donc les résultats des observations de SN 1987A en ce qui concerne le rôle potentiel des supernovae comme fabriques de poussières ?



Images de SN 1987A obtenues entre Octobre 2008 et Janvier 2009 dans les principales longueurs d'onde.