



# Une étrange Supernova: SN1987A. Aspect et spectres.

***Jacques Moret-Bailly***

***jacques.moret-bailly@u-bourgogne.fr***

Exposé à la Société astronomique de France le 17 mai 2008

# Une étrange Supernova: SN1987A.

## Aspect et spectres.

1. Introduction: Brève présentation des observations.
2. Théorie: Introduction de la superradiance et de la diffusion stimulée dans le modèle de Strömgren.
3. Spectroscopie du disque central.
4. Géométrie de la « coquille de Strömgren ».
5. Conclusion.

# 1. Introduction: Brève présentation des observations.

# Évolution de l'étoile

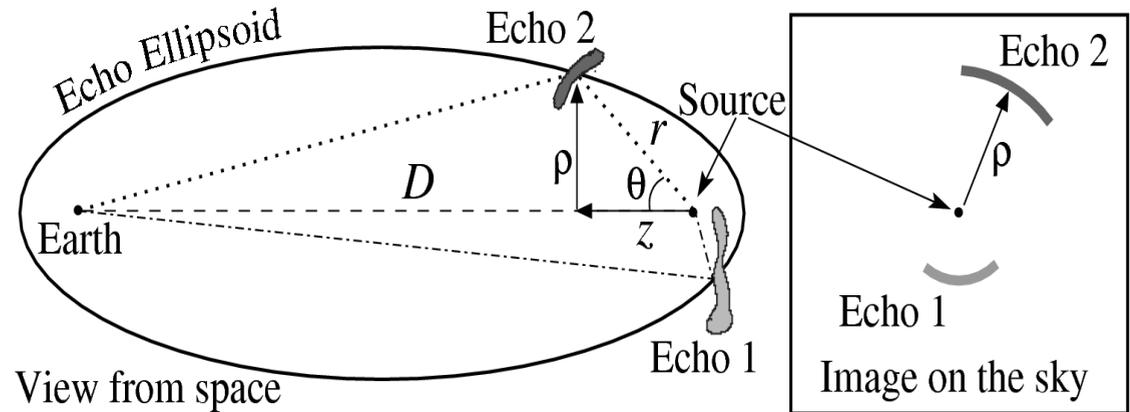
Explosion d'une supergéante rouge -> 20 000 ans -> explosion de supergéante bleue (O) -> 168 000 ans -> observation.

Observée dans le grand nuage de Magellan, en février 1987 par détection de neutrinos, et un accroissement de brillance d'un facteur 100 en 3 heures. La magnitude 3 ainsi obtenue décroît en 3 ans jusqu'à la magnitude 18.

Une forte émission d'UV (14 000 K) s'est rapidement affaiblie par absorption dans une enveloppe gazeuse, ne laissant que des raies d'émission d'éléments légers de l'enveloppe.

La distance de l'étoile a été déterminée par comparaison du temps de propagation des variations d'intensité de la lumière directe ou diffusée par un nuage (écho).

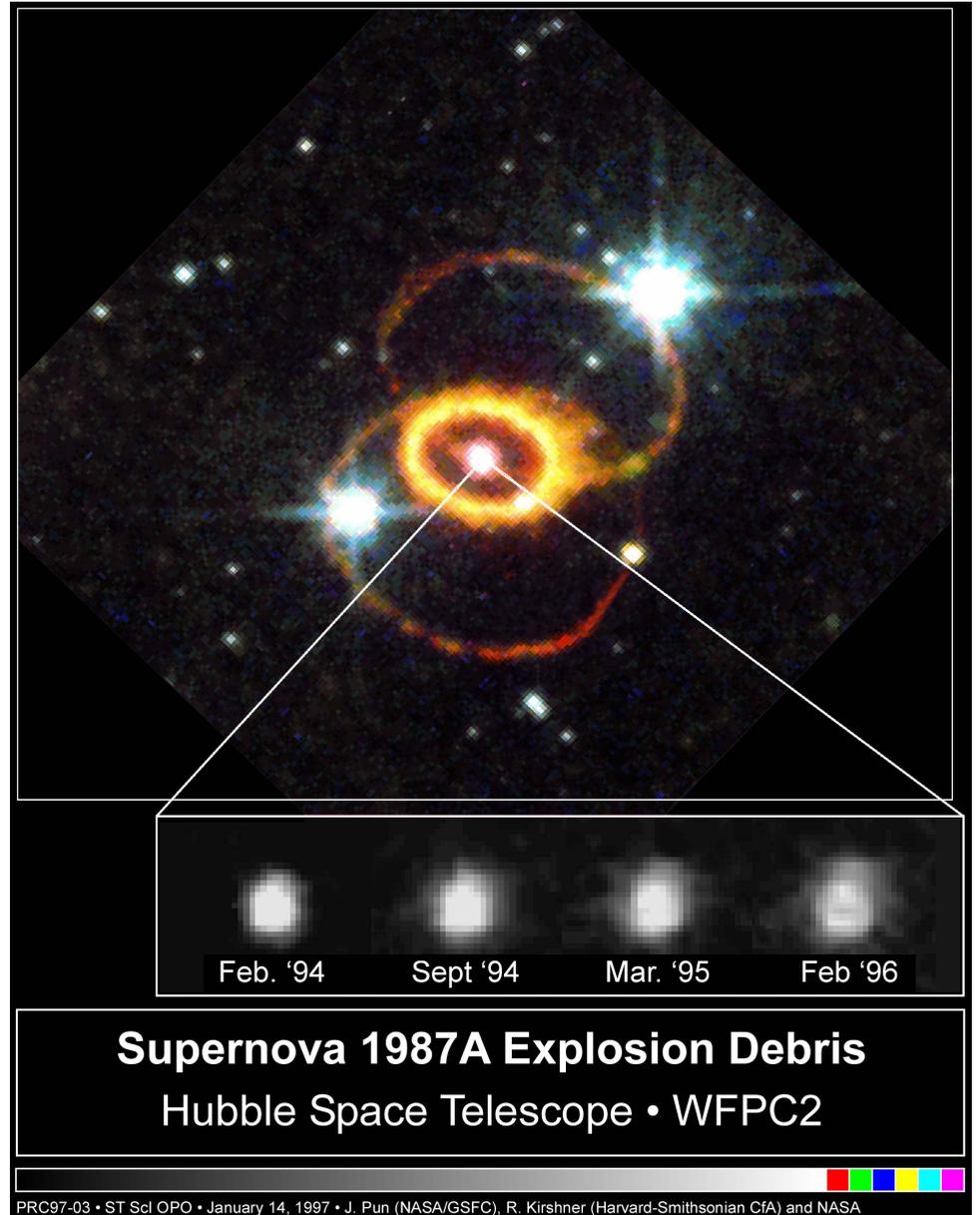
(Sugerman et al., arxiv: astro-ph/0502378 (2005))



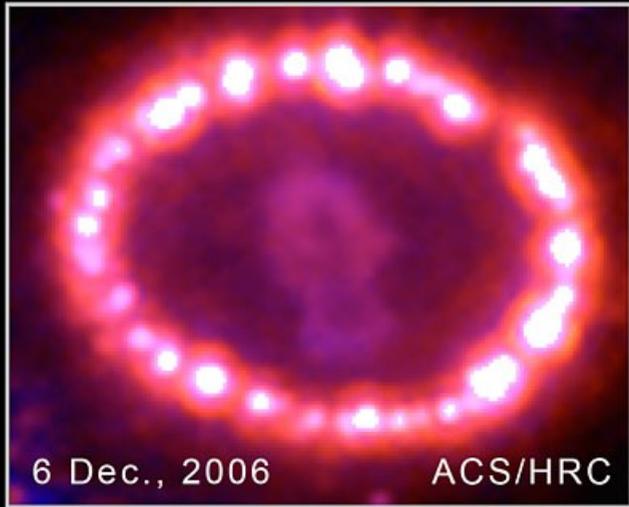
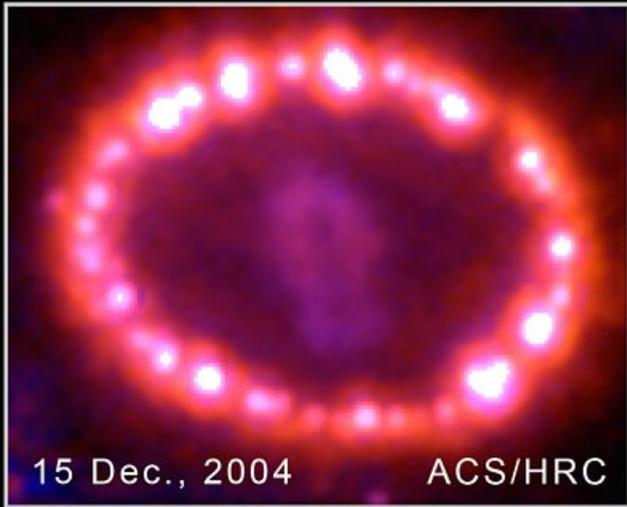
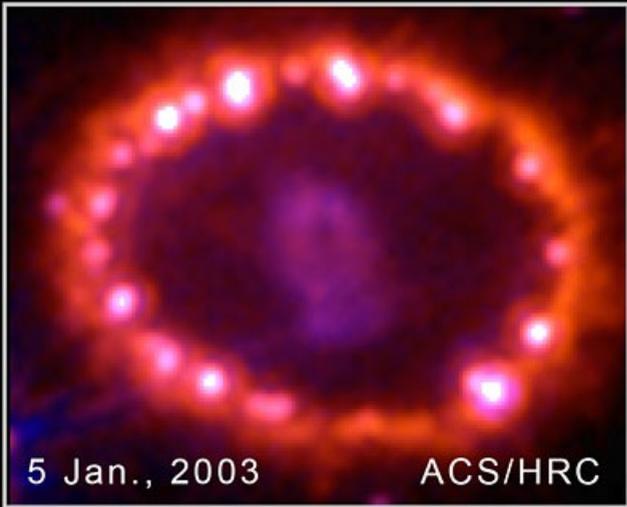
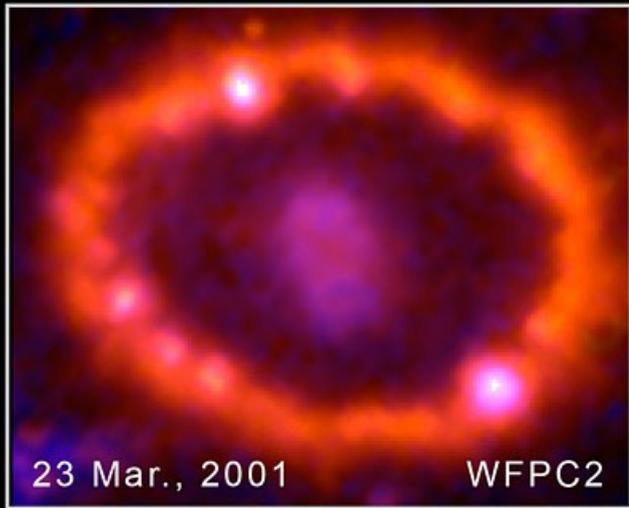
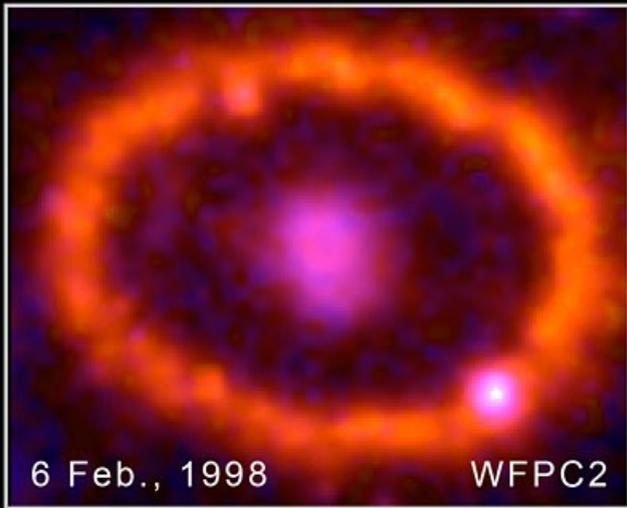
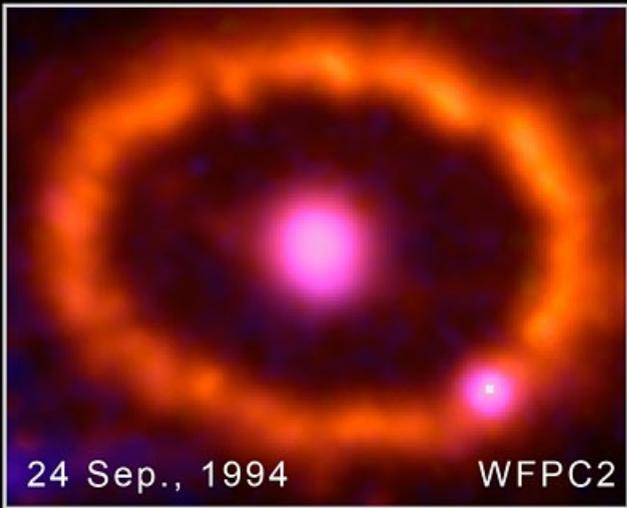
Trois anneaux (colliers de perles) apparaissent pendant que l'étoile disparaît.

L'anneau central est fortement surexposé pour faire apparaître les deux anneaux externes et l'étoile

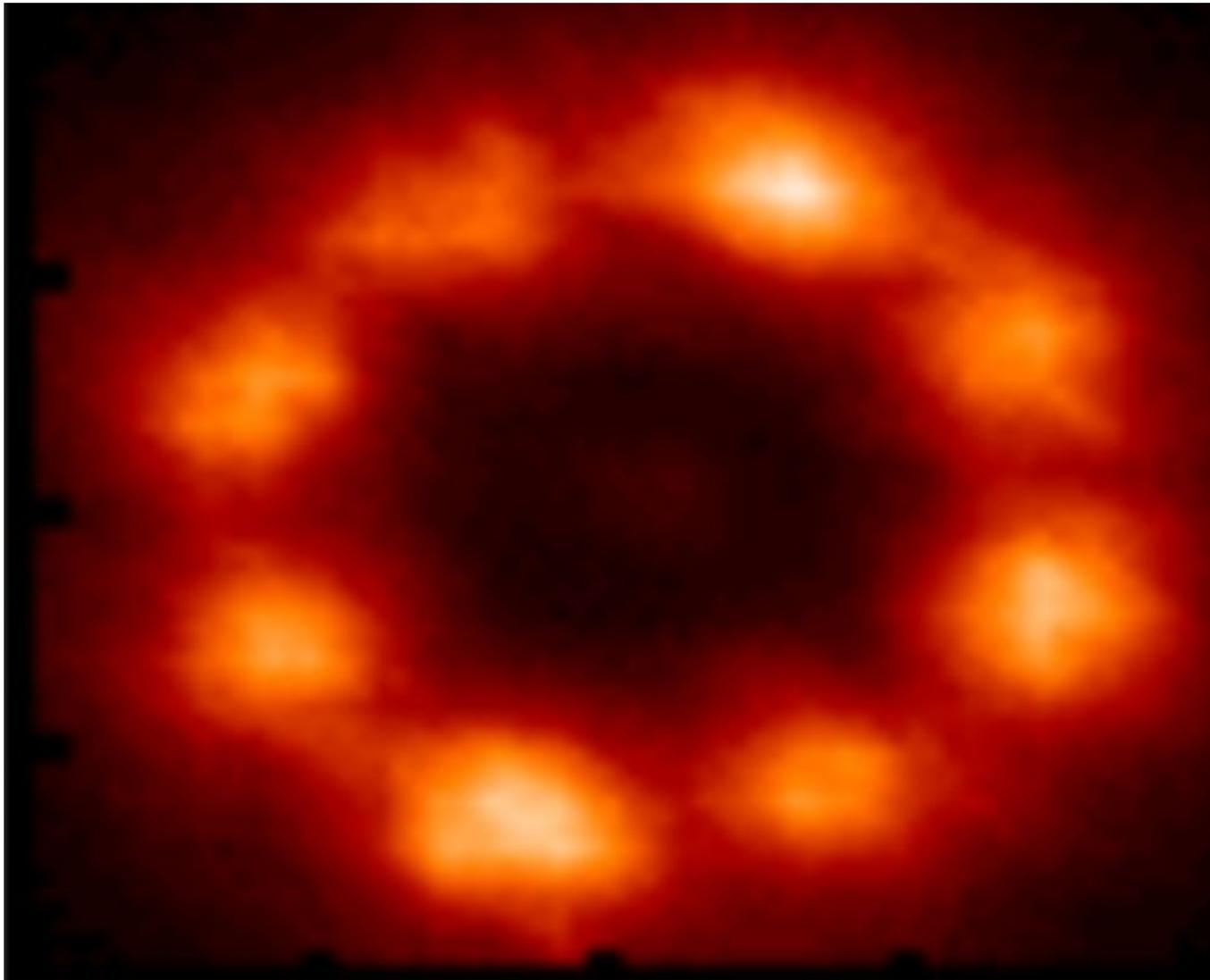
La figure montre l'affaiblissement du flux reçu de l'étoile, à temps de pose constant.



L'étoile s'affaiblit de plus en plus contrairement à l'anneau... (Télescope Hubble)



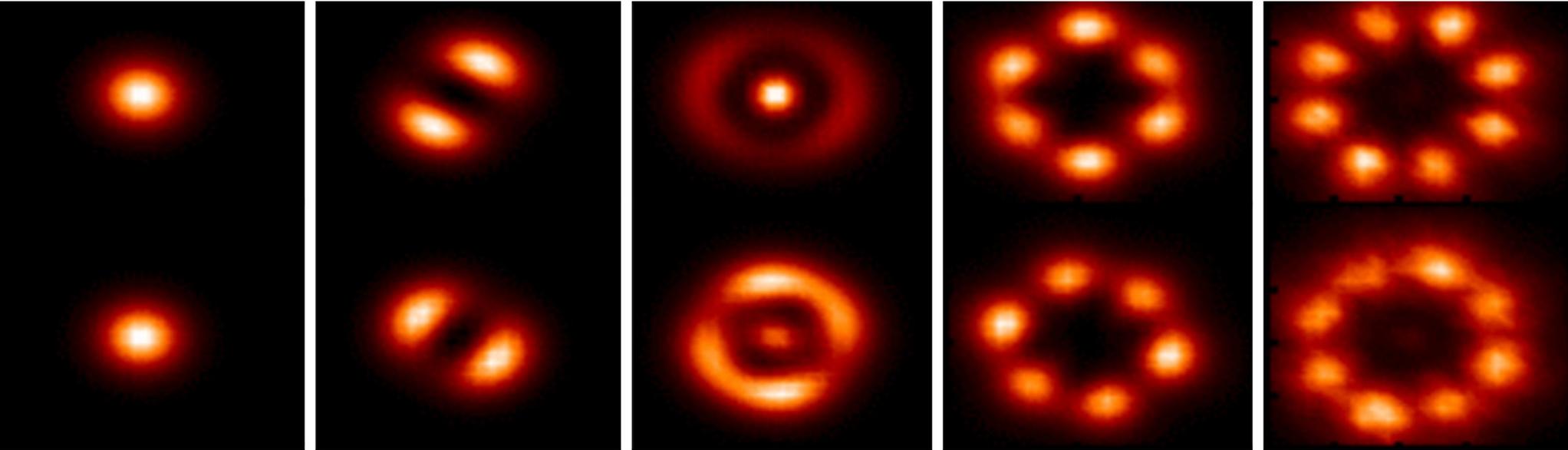
Qu'est-ce?



# Les modes d'un laser !

Il ne peut y avoir un laser dans l'espace, mais le phénomène fondamental du laser, la superradiance demande seulement un long parcours dans un milieu amplificateur.

Modes en marguerite



Extrait de: J. M. POL, Thèse, Université des Baléares, 2002

## 2. Théorie: Introduction de la superradiance et de la diffusion stimulée dans le modèle de Strömgren.

Principes de l'exposé:

- N'utiliser que les lois éprouvées de la physique, électromagnétisme de Maxwell, Planck, Nernst et Einstein, en particulier.
- Accepter cependant de faire varier leurs paramètres hors des domaines expérimentaux usuels.
- Compléter d'abord le modèle de Strömgren.



B. Strömgren

# La sphère de Strömngren

B. Strömngren, ApJ **89**, 526 (1939)

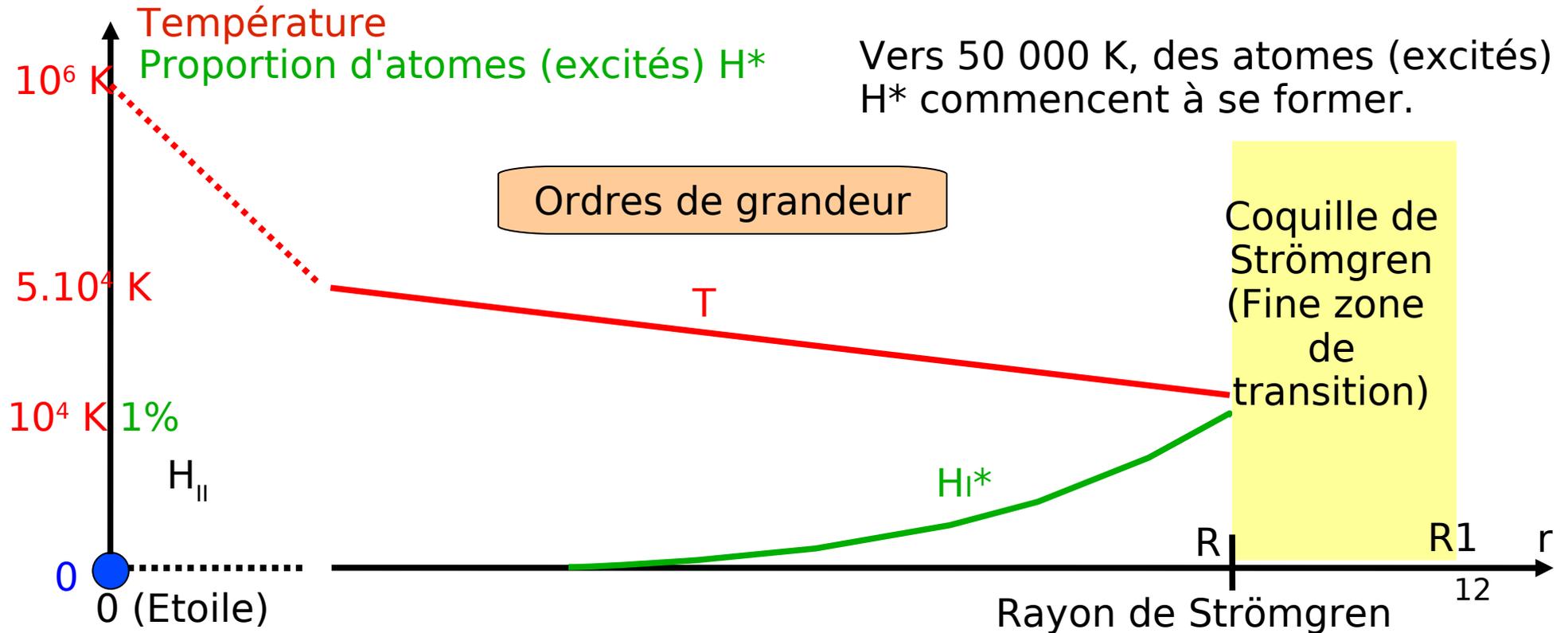
Selon Strömngren, une étoile très chaude (groupes O et B) plongée dans un nuage homogène constitué majoritairement d'hydrogène, engendre une sphère d'hydrogène ionisé H<sub>II</sub> entourée d'hydrogène atomique neutre non excité H<sub>I</sub>.

En effet:

- Tant qu'il subsiste du rayonnement UV extrême, la dissociation des atomes est beaucoup plus rapide que la recombinaison ( $p^+ + e^-$ ).
- Lorsque l'UV extrême est absorbé par des ions plus lourds que  $p^+$ , les atomes perdent rapidement leur excitation par rayonnement, le gaz se refroidit, de sorte que l'UV lointain ne peut plus l'ioniser.

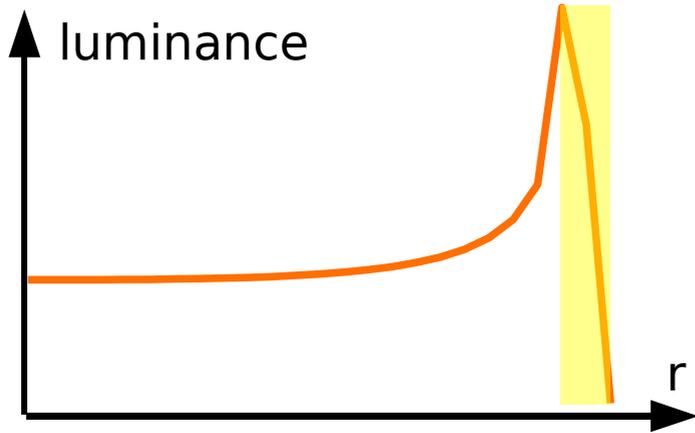
# Composition de la sphère de Strömngren

L'hydrogène, un peu d'hélium et des traces d'autres éléments, sont ionisés dans la sphère.  $H_{II}$  est transparent, mais les autres atomes rayonnent des raies spectrales, refroidissant le gaz dont la température décroît avec  $R$ .



# Aspect d'une sphère de Strömngren

La luminance est supposée proportionnelle à la densité de colonne d'hydrogène atomique excité  $H^*$ .



Aucune ressemblance  
avec SN1987A !



# Effet du rayonnement sur le gaz

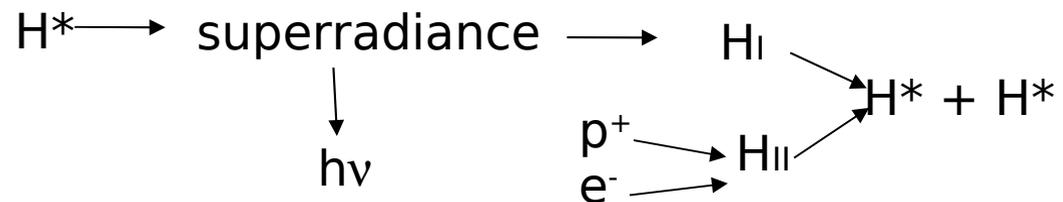
Selon Einstein (1917), dans une source, la variation de luminance  $B$  d'un rayon est  $dB = k B dx$ , où  $k$  est un coefficient négatif pour l'absorption, positif, ici, en émission.

- Si  $k$  est constant, la luminance  $B$  croît exponentiellement.
- Avec une énergie disponible limitée, si  $B$  d'un rayon grandit,  $k$  doit diminuer, les autres rayons sont moins amplifiés: les rayons sont en compétition. Cet effet est nommé superradiance.

La température d'une transition est définie en posant que le rapport des populations des niveaux inférieur/supérieur est  $\exp(h\nu/kT)$ . Comme la transition  $2s \leftarrow 1s$  est interdite, le pompage du gaz par les rayons radiaux (issus de l'étoile) suivi d'une desexcitation spontanée produit facilement une inversion de population entre ces niveaux: on définit, dans ce cas, une température négative.

Le plasma d'hydrogène est un milieu laser, fortement amplificateur, particulièrement sur la raie Lyman  $\alpha$ .

L'énergie intensément dissipée par la superradiance refroidit le gaz aussi rapidement que le permettent les collisions.



**Multiplication  
auto-accélérée  
des atomes neutres**

# Intensité de la superradiance

La superradiance est à l'origine des faisceaux laser.

Dans la plupart des lasers à gaz, la pression est de l'ordre de 100 Pa à froid et le parcours moyen de la lumière dans le plasma et ses images, de l'ordre de 100 m.

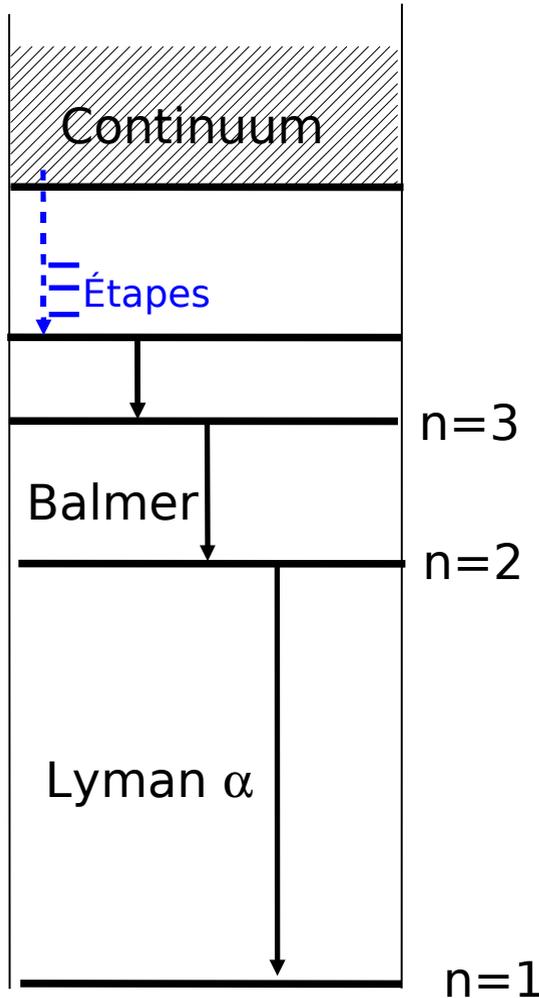
Ainsi, la densité de colonne  $\Delta'$  est de l'ordre du produit du nombre d'Avogadro par le nombre de moles par  $\text{m}^3$ , par le rapport de 100 Pa à la pression normale, et par le parcours, soit environ:

$$\Delta' = (6 \cdot 10^{23})(0,022)(10^{-3})(100) = 1,3 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-2}.$$

Autour de la supernova 1987A, la densité d'atomes est  $10^{10} \text{ m}^{-3}$ . Avec un diamètre de la sphère de Strömgren supérieur à 1 année-lumière, il est raisonnable de considérer des parcours de 1/100 a-l dans le plasma de la coquille ( $\text{H}_I + \text{H}^* + \text{H}_{II}$ ), soit environ  $10^{14} \text{ m}$ . Densité de colonne:  $\Delta = 10^{24}$ .

Avec une densité de colonne 1000 fois plus grande, la température du rayonnement tendra vite vers la température (supposée positive) de la transition dans le plasma. **La superradiance est intense.**

# Raies superradiantes



Des cascades de transitions désexcitent l'hydrogène.

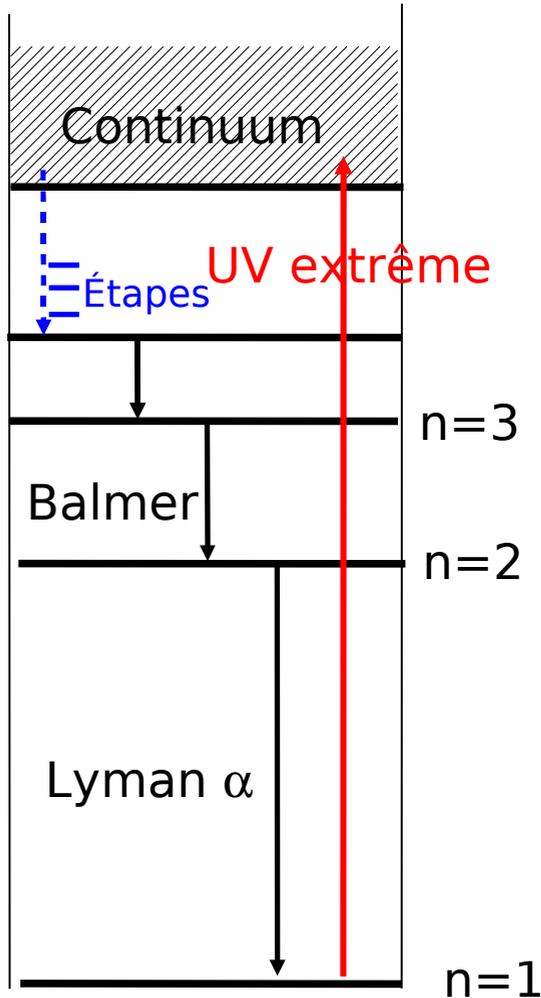
Par exemple, la désexcitation du niveau  $n=2$  par un rayon superradiant Lyman  $\alpha$  favorise les émissions Balmer sur le trajet de ce rayon, donc une superradiance dans un mode de géométrie voisine: une cascade de désexcitations définit un "mode superradiant polychromatique".

Du fait des superradiances intenses, les étapes de la désexcitation sont simultanées (multiphotoniques), le peuplement des niveaux excités est virtuel. L'état d'un niveau habillé par le champ radial intense est une combinaison linéaire de nombreux états stationnaires.

Les diverses possibilités de cascades sont en compétition, limitant le nombre de raies émises.<sup>16</sup>

Echelle non respectée.

# Diffusion induite



L'émission superradiante polychromatique due aux cascades multiphotoniques:

- dépeuple rapidement les niveaux d'énergie élevés, favorisant, des collisions réactives entre protons et électrons qui conduisent directement aux atomes d'hydrogène non excités.

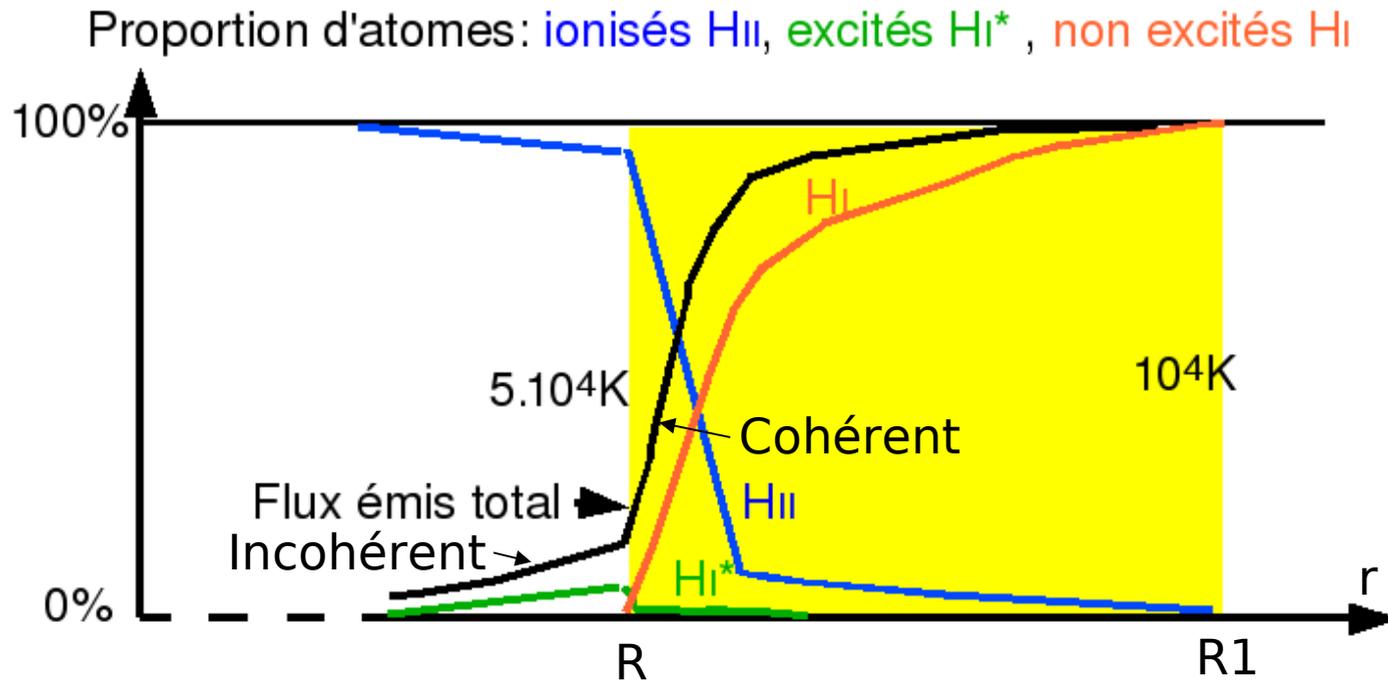
- est une composante d'une transformation directe des rayonnements issus de l'étoile en une amplification de la cascade (diffusion induite).

La haute densité de rayonnement fait disparaître les « frottements » qui s'opposent à un accroissement rapide de l'entropie du rayonnement, par un transfert de l'énergie des rayons radiaux très chauds (d'après la loi de Planck) vers les rayons superradiants moins chauds.

Echelle non respectée.

# Physique de la coquille de Strömngren

L'amorçage de superradiances désexcite brutalement l'hydrogène, le refroidit, provoquant une désionisation rapide.

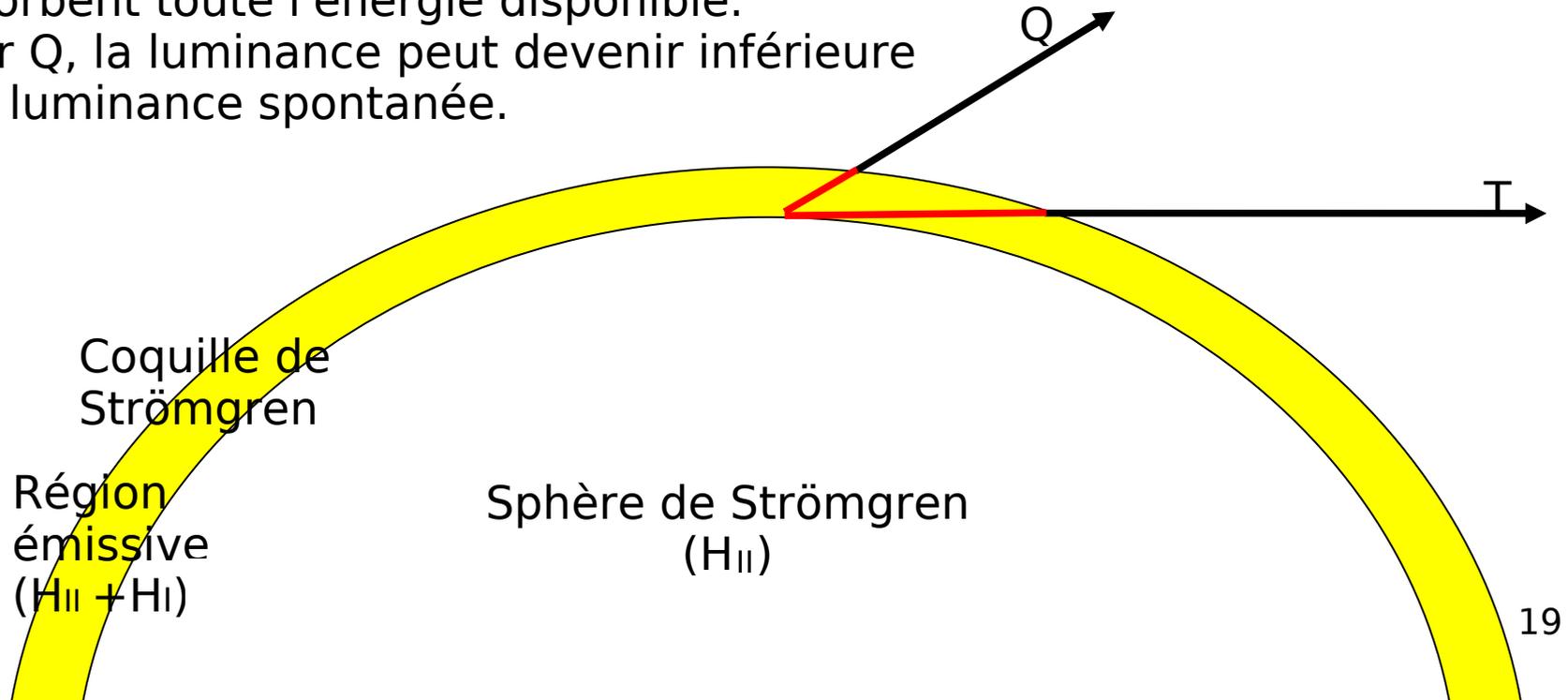


# Optique de la superradiance

Les rayons tangent T et quelconque Q traversent des régions équivalentes, mais sur des chemins dans la coquille plus longs pour T. La luminance de T croît plus vite.

Si l'émission est intense, quelques rayons T absorbent toute l'énergie disponible.

Pour Q, la luminance peut devenir inférieure à la luminance spontanée.

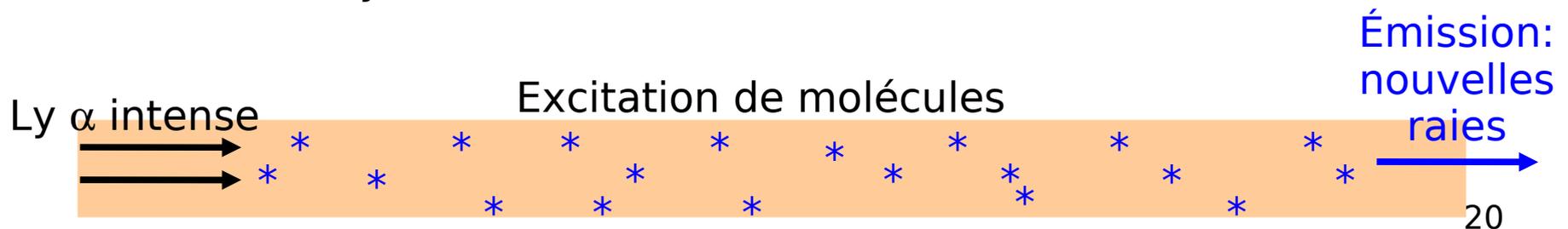


# Génération de l'anneau

Les rayons émis dans une direction donnée et tangents à la sphère de Strömngren forment les génératrices d'un cylindre vu comme un anneau.

Deux rayons parallèles trop voisins sont en compétition; on observe un système de modes orthogonaux formant un anneau discontinu : le « collier de perles ».

En se propageant au delà de la coquille, un rayon superradiant ( $\text{Ly}\alpha$  ou autre) excite une colonne de molécules mono- ou polyatomiques diverses \* susceptibles d'émettre des raies fines. Cette longue colonne de gaz excité froid peut être superradiante et émettre des rayons collinéaires à raies très fines.



# Comment l'étoile disparaît

Les atomes « habillés » par les rayons radiaux amplifient directement les rayons de cascades superradiantes incluant éventuellement un continuum de translation ou d'ionisation.

Pour que l'augmentation d'entropie soit maximale, les transitions diminuant le nombre quantique principal de 1 constituent essentiellement les cascades superradiantes.

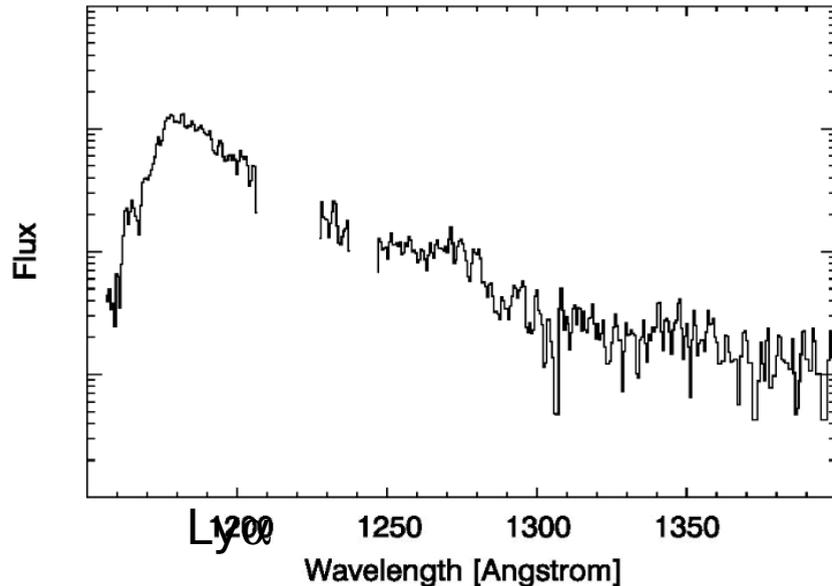
Les diffusions obéissent au 2<sup>o</sup> principe de la thermodynamique : les températures, donc les luminances de l'étoile et des anneaux tendent à s'égaliser.

Comme l'étoile est vue sous un angle solide beaucoup plus faible que les perles, elle devient invisible.

La diffusion des rayons radiaux au bénéfice des rayons superradiants est quasiment totale.

# 3. Spectroscopie du disque central.

# Spectre du disque intérieur



Le disque intérieur à l'anneau a maintenant une luminance sensiblement uniforme dans l'ultraviolet, et émet environ le dixième du flux de l'étoile. Eli Michael et 20 co-auteurs ont obtenu ce spectre du disque (ApJ **593**, 809, 2003).

Y voit-on une structure ou du bruit ?

Selon Michael, c'est une raie Lyman  $\alpha$  élargie vers le rouge. L'application de la loi de Hubble au rougissement maximal donnerait une distance supérieure à 2 milliards d'années-lumière alors que la distance mesurée par échos de photons et triangulation est 168 000 années-lumière.

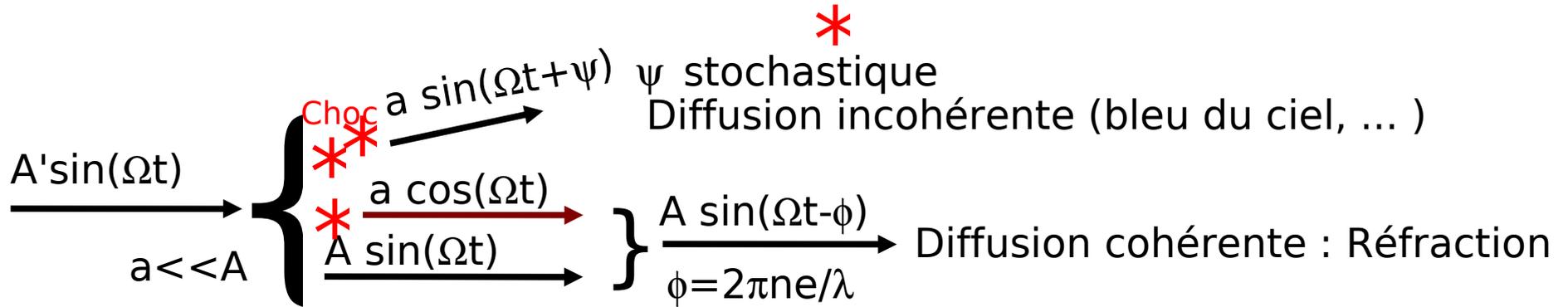
**Michael et al. rejettent** implicitement **la loi de Hubble** en proposant une explication alternative du rougissement par des diffusions incohérentes<sup>23</sup> dans H<sub>I</sub> analogue aux explications imaginées pour « réduire » la distance des quasars, mais abandonnées.

# Diffusions de la lumière

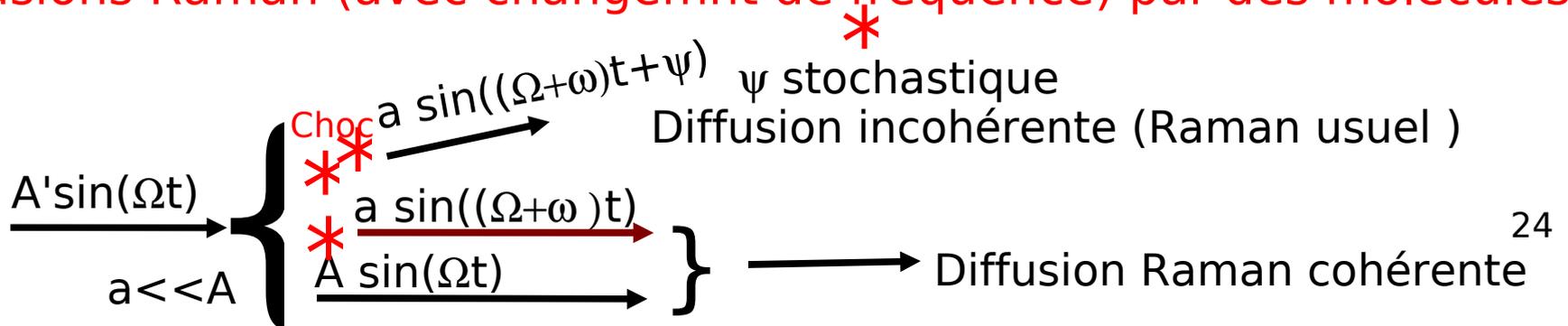
Par la construction de Huygens, les diffusions cohérentes génèrent des surfaces d'onde identiques aux surfaces d'onde de la lumière excitatrice, d'où possibilité d'interférence des deux ondes.

Les diffusions incohérentes requièrent des fluctuations de densité (chocs).

Diffusion Reyleigh (sans changement de fréquence) par des molécules.



Diffusions Raman (avec changement de fréquence) par des molécules.



# Critique de l'Interprétation de Michael et al.

## Problèmes :

1. Les diffusions incohérentes sont produites par des fluctuations de densité à l'échelle de la durée des impulsions. Dans un gaz dilué, les fluctuations les plus fréquentes sont des collisions binaires dont le nombre est proportionnel au carré de la pression. Avec une densité d'atomes de  $10^{10} \text{ m}^{-3}$ , les diffusions incohérentes sont négligeables.

Il faut donc envisager des interactions cohérentes.

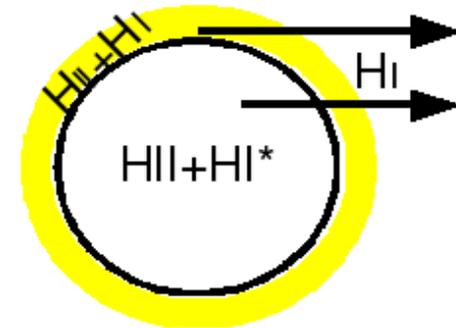
2. Le spectre des anneaux est formé de raies fines (assez fine pour  $\text{Ly}\alpha$ ). Les atomes non excités, très majoritaires à l'extérieur de la sphère de Strömgren ne sont pas actifs. Comme  $\text{HII}$  ne peut pas être actif, et comme les autres atomes sont rares:

les atomes actifs ne peuvent être que des atomes d'hydrogène excité.

3. Une interaction Rayleigh ne peut convenir car:

- Il n'y a pas d'élargissement collisionnel des raies;
- elle n'a pas d'élargissement Doppler en diffusion cohérente.

En fait, elle est à l'origine de la réfraction.



# Conditions d'un effet Raman cohérent

## Thermodynamique

Pour ne pas saturer le milieu actif (ce qui briserait les cristaux souvent utilisés dans ces expériences), il faut que le bilan énergétique soit nul pour la matière, donc que plusieurs effets Raman soient combinés. L'effet est dit **paramétrique**.

Conformément au second principe de la thermodynamique, il faut que les rayons chauds transfèrent de l'énergie aux rayons froids. Sauf lorsque les différences de luminances sont grandes, les fréquences lumineuses sont abaissées au bénéfice des fréquences radio.

## Maintien de la cohérence.

Condition de Lamb: La durée des impulsions de lumière doit être inférieure à toutes les constantes de temps impliquées.

Les impulsions de lumière naturelle durant 1 ns:

- un temps collisionnel long est nécessaire, il faut utiliser un gaz sous basse pression.
- une longue période Raman est nécessaire: pour cette raison, la résonance 1420 MHz de  $H_I$  non excité ne convient pas, alors que les résonances des niveaux 2S et 2P (178, 59 et 24 MHz) conviennent.

# 4. Géométrie de la « coquille de Strömngren ».

# Pour une amélioration du modèle

- Le simple modèle de Strömgren, et l'utilisation de l'optique cohérente, y compris les rougissements introduits pour d'autres études, ont construit
- une image de supernova assez conforme aux observations.

Une complexification du modèle utilisant les observations paraît nécessaire.

Au départ, nous suggérons quatre améliorations:

- - Introduction d'une inhomogénéité dans le nuage gazeux: la coquille de Strömgren peut se former où la densité est accrue par des ondes de choc.
- - peut-être: Ajout de deux astres pour obtenir trois anneaux;
- - Spectroscopie sérieuse des gaz autres que l'hydrogène;
- - Etude quantitative du rayonnement des atomes d'hydrogène habillés.

# Les trois anneaux

Il semble qu'il y ait trois coquilles de Strömgren !

Les deux sphères extérieures pourraient être créées par deux petits astres éjectés de l'étoile principale lors d'une explosion antérieure de la supergéante. Ces astres pourraient être très petits et très chauds, donc ils pourraient produire assez d'ultraviolet extrême pour construire des coquilles de Strömgren, tout en rayonnant peu aux plus grandes longueurs d'onde.

En fait, les coquilles ne sont pas sphériques: en supposant qu'une plus forte densité de gaz se trouve d'une part dans la direction de l'explosion, d'autre part au voisinage de l'axe de l'explosion, la coquille principale devient voisine d'un ellipsoïde aplati, les autres deviennent piriformes.

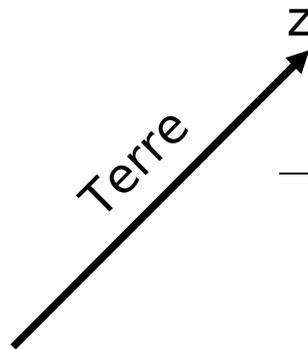
Y a-t-il une fusion des trois coquilles donnant le « sablier » observé par échos de photons?

# COUPE des coquilles

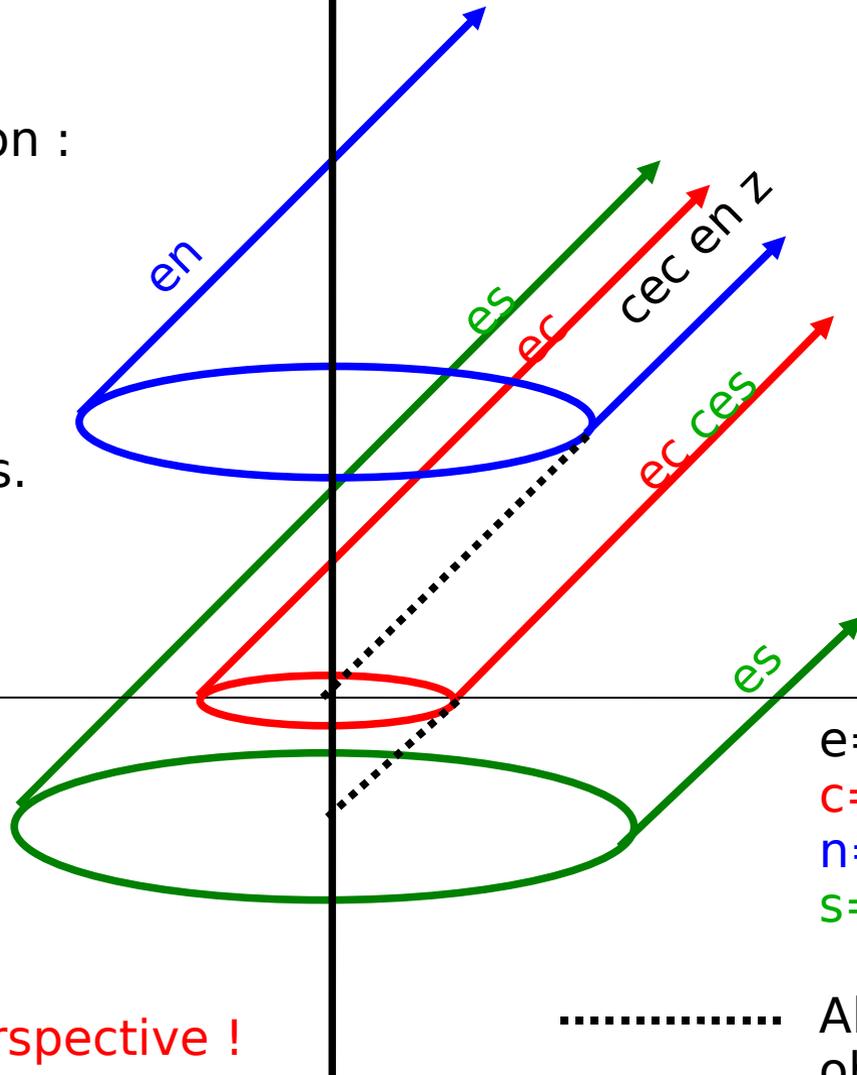
passant par la  
Terre et l'axe de  
révolution de la  
supernova,  
et rayons émis  
tangentiellement  
dans ce plan.

Hypothèses  
d'approximation :

Supernova de  
révolution.  
Coquilles  
ellipsoïdales,  
non fusionnées.



Axe de la supernova



e=ellipsoïde  
c=central  
n=nord  
s=sud

Ce n'est pas une perspective !

..... Alignements  
observés

# Source des anneaux

C. L. Martin, D. Arnett  
ApJ 447:378 1995

Projections of Rings  
for Concave Disk

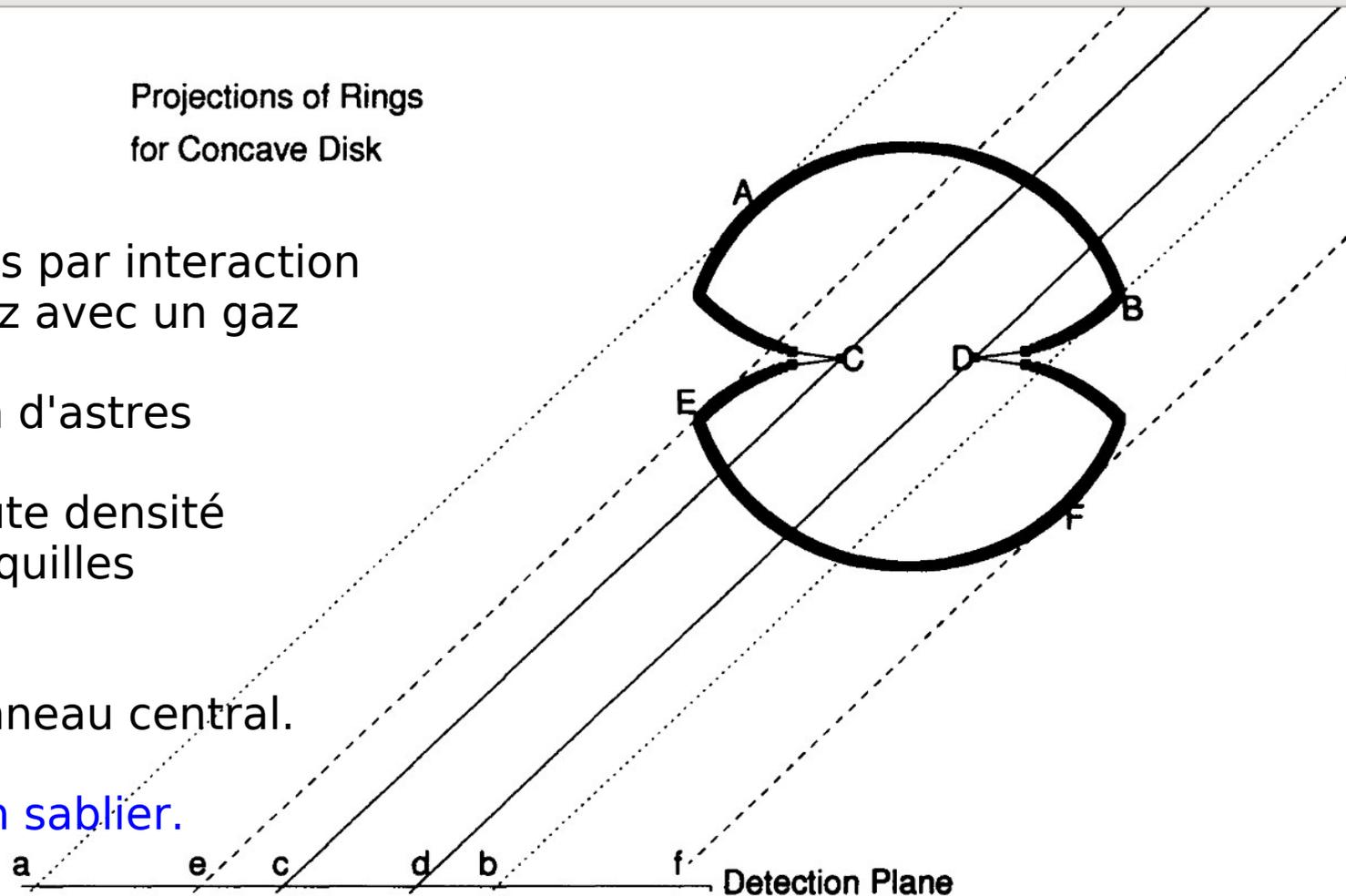
Champignons créés par interaction  
de deux jets de gaz avec un gaz  
pré-existant.

Évite l'introduction d'astres  
secondaires.

Les régions de haute densité  
deviennent des coquilles  
de Strömngren.

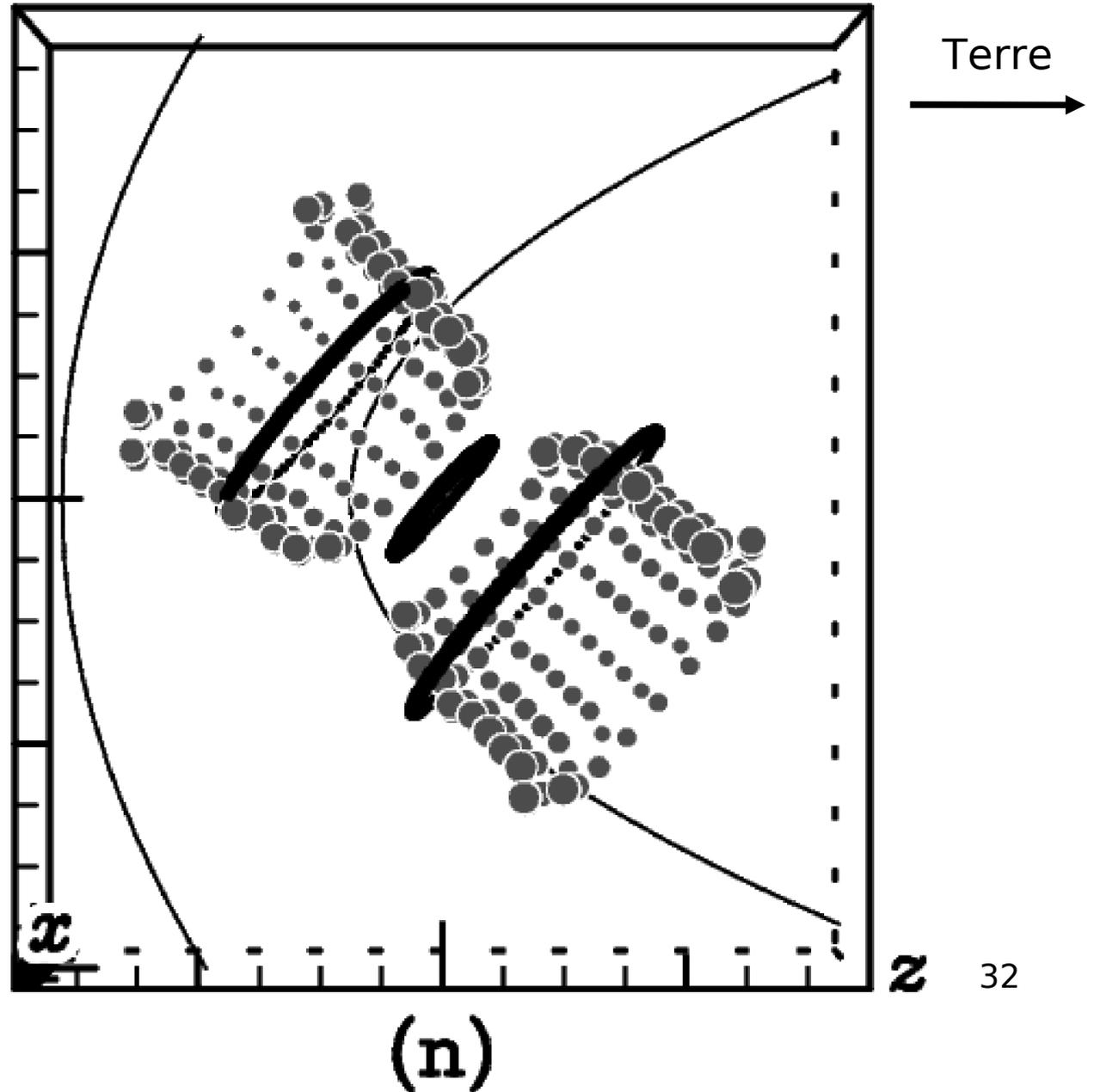
Problème pour l'anneau central.

Se rapprocher d'un sablier.

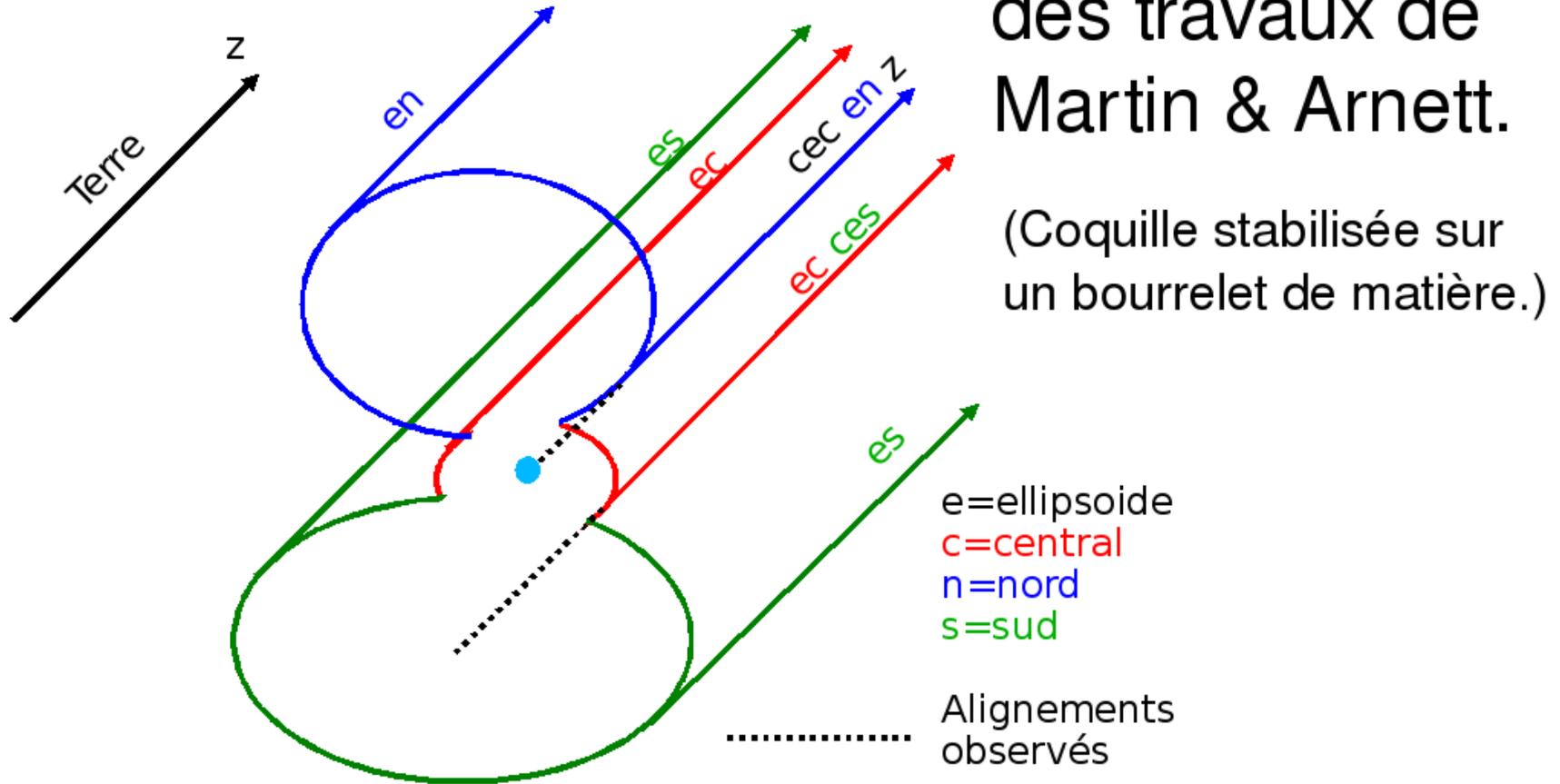


B. E. K. Sugerman et al.  
arxiv:astro-ph/0502378

Figure obtenue à partir  
d'échos.  
On obtiendrait la forme  
de sablier en modifiant  
les régions éloignées ou  
proches du centre, peu  
précises.



# Coupe d'une coquille de Strömngren inspirée des travaux de Martin & Arnett.



Une symétrie de révolution n'est pas supposée a priori.

On peut jouer sur tant de paramètres qu'un travail important est nécessaire.

# 5. Conclusion

Il suffit d'ajouter au modèle de Strömngren l'utilisation de méthodes spectroscopiques d'utilisation habituelle dans les laboratoires travaillant sur les lasers pour obtenir un modèle ressemblant étonnement à la supernova 1987A.

Si cette utilisation paraît convainquante, il reste beaucoup de travail de mise au point et de recherche d'autres applications de la spectroscopie cohérente en astrophysique.