

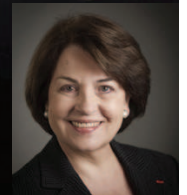
Lumière zodiacale et nuage zodiacal

A.-Chantal Levasseur-Regourd

UPMC (Univ. P. & M. Curie) / LATMOS-CNRS

aclr@latmos.ipsl.fr

La Silla, Chile, sept. 2009
Y. Beletsky, ESO





Lumière zodiacale et nuage zodiacal

Cassini et la lumière zodiacale

Lumière zodiacale et diffusion lumineuse

Émission thermique et nuage zodiacal

Nuage zodiacal et évolution du système solaire

(Lumière zodiacale, implications hors système solaire)

Cassini et la lumière zodiacale...

J.D. Cassini, *journal des savants*, 1683

*Nouveau phénomène rare et singulier
d'une lumière céleste qui a paru au
commencement du printemps
de cette année*

J.D. Cassini, *Académie des sciences*, 1693

*Découverte de la lumière céleste
qui paroît dans le zodiaque*

Observations bien documentées

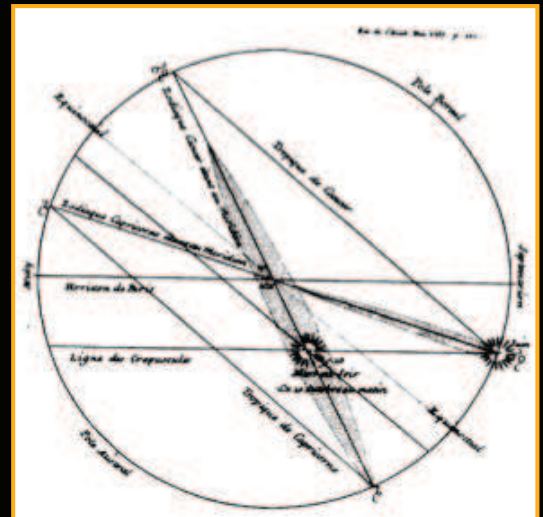
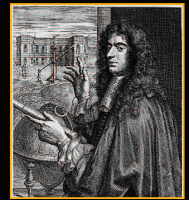
(informations géométriques, déplacement
annuel, extension à plus de 60° du Soleil,
écart plan de symétrie / écliptique)

Discussions (variabilité, durée de vie)

Origine du phénomène

(nuage aplati diffusant mieux la lumière pour
une ligne de visée se rapprochant du Soleil)

⇒ **Lumière zodiacale déjà vue avant Cassini
mais première approche scientifique**



Sous nos latitudes, la lumière zodiacale
est bien observable en soirée au printemps,
alors que l'écliptique est haut sur l'horizon

Cassini et la lumière zodiacale...

Un phénomène dont l'observation et la description deviennent classiques aux XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles, en l'absence de pollution lumineuse

J.J. Dortous de Mairan, 1733

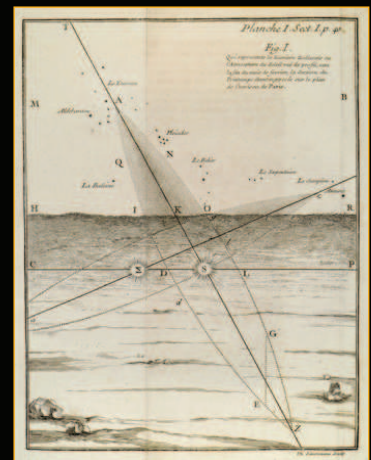
Traité physique et historique de l'aurore boréale

Nuage zodiacal au delà de l'orbite terrestre

E.A. Poe, 1835 (traduction C. Baudelaire)

Aventure sans pareille d'un certain Hans Pfall

« Le phénomène qui affecte la forme lenticulaire et qu'on appelle la lumière zodiacale était aussi un point digne d'attention. Cette lumière si visible sous les tropiques, et qu'il est impossible de prendre pour une lumière météoritique quelconque, s'élève obliquement de l'horizon et suit généralement la ligne de l'équateur du soleil » (!)



Traité physique, J.J.D. de Mairan



Le Ciel, A. Guillemin

Cassini et la lumière zodiacale

J.D. Cassini

Les nouvelles découvertes ne sont pas si considérables dans leur commencement, qu'elles le deviennent dans la suite : la continuation des observations est ce qui les perfectionne, et ce qui en fait connoître la grandeur & les conséquences....



A. von Humboldt, 1800 et 1847

Voyage aux régions équinoxiales ; Cosmos

« À Dominique Cassini revient le mérite incontestable d'avoir, le premier, soumis le phénomène du Gegenschein à un examen approfondi, dans le printemps de 1683 »

(On comprendra plus tard qu'il s'agit de rétro-diffusion, de la lumière solaire par les particules solides du nuage interplanétaire dans la direction anti-solaire)



Gegenschein au dessus du VLT, Y. Beletsky

A.W. Wright, 1874

On polarization of zodiacal light

Spectre analogue au spectre solaire et polarisation linéaire partielle

⇒ Lumière solaire diffusée par des petits corps gravitant autour du Soleil, surtout près de l'écliptique et du Soleil (?)

Lumière zodiacale et diffusion lumineuse...

Dufay ; Lyot (1925 et 1930)

Lumière zodiacale, premiers clichés et détection de la couronne F par coronographie

Helios 1,2 ; Pioneer 10,11 (années 70-80)

Observations dans l'espace profond

⇒ Origine du Gegenschein établie

Lumière zodiacale estimée dans certaines directions, depuis l'écliptique, entre $\approx 0,3$ AU et 20 UA

Dumont ; Weinberg (années 60)

D₂A, D₂B, Salyout 7 (années 70-80)

Observations photo-polarimétriques
Complémentarité entre observations sol (composante atmosphérique, lumière du ciel nocturne) et en orbite terrestre (contraintes techniques)

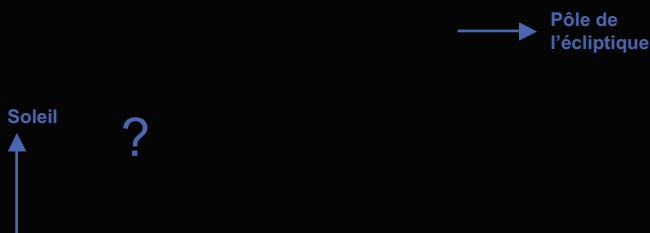
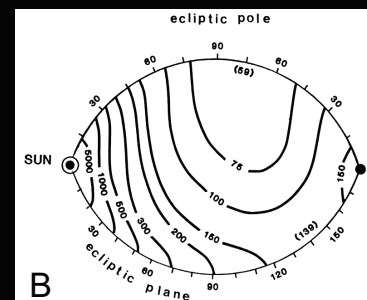
Lumière zodiacale et diffusion lumineuse...

Résultats intégrés, brillance

Accord données sol (Dumont) & espace (Levasseur-Regourd)

⇒ Positionnement du plan de symétrie par rapport à l'écliptique *au niveau de la Terre* (oscillations de la brillance zodiacale au pôle, avec $i \approx 1,5^\circ$ et $\Omega \approx 95^\circ$)

⇒ Malgré des inhomogénéités locales (essaims météoritiques, traînées cométaires...), estimation de la brillance B_λ (coordonnées hélio-écliptiques corrigées)



Clementine, lumière zodiacale interne (Nasa 1994)

Brillance zodiacale, en S_{10} (V), depuis la Terre, en fonction des latitude et longitude hélio-écliptiques (d'après Levasseur-Regourd et Dumont, A&A, 1980) avec $1 S_{10}$ (V) = $1,261 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ m}^{-1}$ à $0,55 \mu\text{m}$

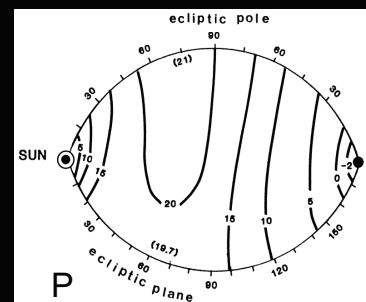
Lumière zodiacale et diffusion lumineuse...

Résultats intégrés, polarisation

Diffusion de la lumière solaire sur particules irrégulières

(concentration croissant vers le Soleil et l'écliptique, mais milieu optiquement mince)

⇒ Polarisation linéaire partielle P (entre -1 et +1), négative dans la région du Gegenschein (E // plan de diffusion, au voisinage de la rétro-diffusion)



$$B = (I_{\perp} + I_{\parallel})$$

$$P = (I_{\perp} - I_{\parallel}) / (I_{\perp} + I_{\parallel})$$

Levasseur-Regourd
et al., PSS, 2007

Polarisation zodiacale, en %, depuis la Terre, en fonction des latitude et longitude hélio-écliptiques (Levasseur-Regourd et al., in Interplanetary dust, 2001)

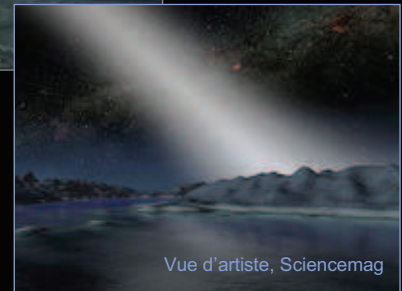
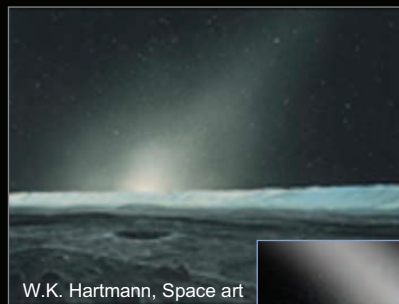
Pôle de l'écliptique →

P β λ-λ _{sol}	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	45°	60°	75°	90°
0°				8	10	11	12	16	19	20	20
5°				9	10	11	12	16	19	20	20
10°			11	11	12	13	14	17	19	20	20
15°	13	13	13	13	13	14	15	17	19	20	20
20°	14	14	14	15	15	15	15	17	19	20	20
25°	15	15	16	16	16	16	16	18	19	20	20
30°	16	16	16	16	16	17	17	18	19	20	20
35°	17	17	17	17	17	17	17	18	20	20	20
40°	17	17	17	17	18	18	18	19	20	20	20
45°	18	18	18	18	18	18	18	19	20	20	20
60°	19	19	19	19	19	20	20	20	20	20	20
75°	18	18	18	18	18	19	19	19	19	19	20
90°	16	16	16	16	16	16	17	18	18	19	20
105°	12	12	12	12	13	13	14	15	17	19	20
120°	8	8	9	9	9	10	11	13	15	18	20
135°	5	5	5	6	6	7	8	11	14	17	20
150°	2	2	2	3	3	4	5	8	12	16	20
165°	-2	-2	-1	-1	0	2	3	7	11	16	20
180°	0	-2	-3	-2	-1	0	2	6	11	16	20

↑ Soleil

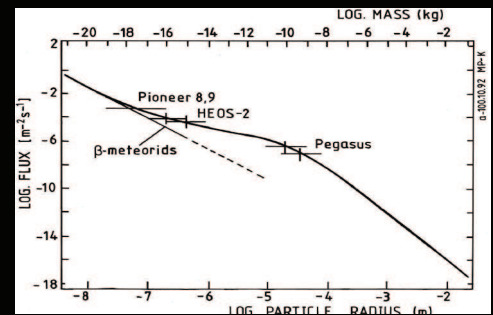
Lumière zodiacale et diffusion lumineuse

Lumière zodiacale et espace profond
 Observations depuis l'écliptique
 Entre 1 et 0,3 UA (pour 3 directions),
 brillance zodiacale \approx en $R^{-2,3}$ avec
 R distance de la sonde au Soleil
 Au delà de 1 UA, brillance zodiacale
 en $R^{-2,5 \pm 0,2}$, en fait indétectable
 au delà de la ceinture d'astéroïdes



Détection des particules solides par impact
 Environnement terrestre, lois puissance
 (exposant \approx -3.5, -2.3, -4.4) typiques de
 fragmentation et de collisions

Environnements de Jupiter (Ulysses & Galileo)
 et de Saturne (Cassini), découverte entre
 1993 et 2004 d'essaims de petites particules
 solides, susceptibles d'interagir avec les
 magnétosphères de ces planètes géantes



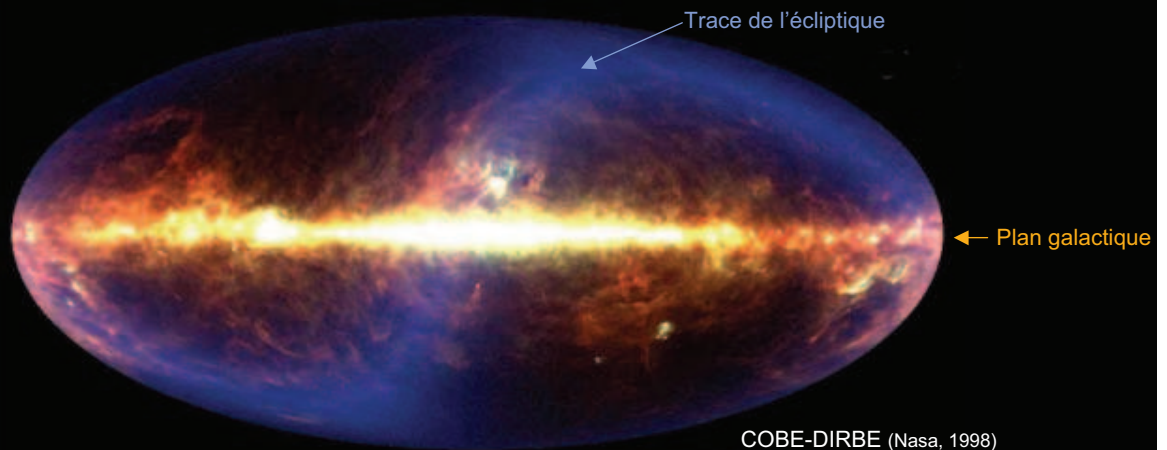
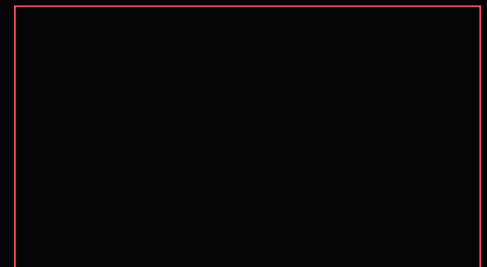
Émission thermique et nuage zodiacal...

Satellites d'astronomie infrarouge

Détection de l'émission thermique zodiacale, en particulier avec IRAS (1984), COBE (1995), Spitzer (2004)

⇒ T 'intégrée' ≈ 260 K

⇒ Inhomogénéités locales accentuées, avec tores de poussières astéroïdales (collisions dans les Themis, Eos, Koronis...) et traînées le long d'orbites cométaires



COBE-DIRBE (Nasa, 1998)
Projection carte du ciel à 60 μ m

Émission thermique et nuage zodiacal...

Nécessité d'une inversion des données

Propriétés des particules solides émettant dans l'infrarouge changeant avec la distance R au Soleil, et aussi avec l'angle de phase α pour la diffusion lumineuse

$$I_\lambda = \int_{\text{ligne de visée}} n(R) E_\lambda(R, T) dl$$

Techniques d'inversion

Accès à des informations locales
(sondage optique tangentiellement à la trajectoire de la Terre ; nœuds de moindre incertitude avec couples d'observations $[T_1, T_2]$...

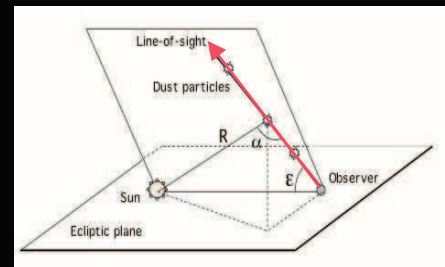
Propriétés locales...

Dans le plan de symétrie du nuage (proche de l'écliptique) et pour R au delà de 0,3 UA

- Température locale

$$T(R) \approx 250 R^{-0,36 \pm 0,03} \text{ K}$$

⇒ Pas un corps noir



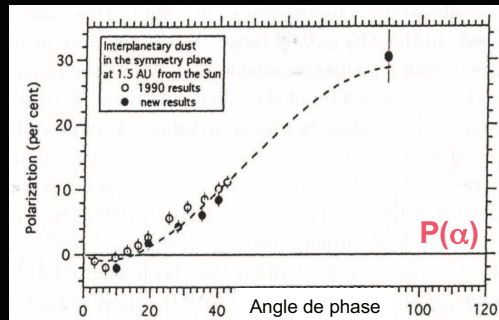
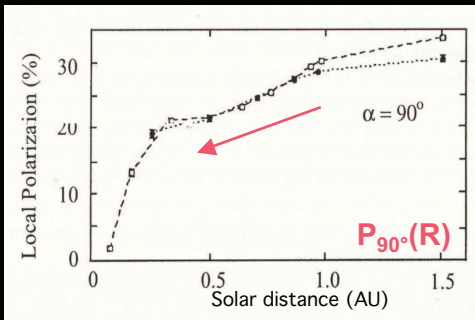
Levasseur-Regourd et al., PSS, 2007

Émission thermique et nuage zodiacal

Propriétés locales, diffusion lumineuse

Toujours dans le plan de symétrie du nuage (proche de l'écliptique)

- Concentration locale $n(R) \approx 10^{-19} R^{-0,93 \pm 0,07} \text{ kg m}^{-3}$
 $\Rightarrow \approx 5$ particules (d'environ $10 \mu\text{m}$) / km^3 ; variation en $1/R$?
- Polarisation locale ($\alpha = 90^\circ$, à $0,55 \mu\text{m}$) $P(R) \approx 30 R^{+0,5 \pm 0,1} \%$
 \Rightarrow Nuage hétérogène (propriétés changeant avec R , et donc avec T ?)
- Courbes de phase polarimétriques 'lisses'
 (comme pour comas cométaires et les régolites astéroïdaux)
 \Rightarrow Particules irrégulières de taille $> \approx 0.7 \mu\text{m}$ (longueur d'onde observations)



Levasseur-Regourd et al., In Interplanetary dust, 2001

Nuage zodiacal et évolution du système solaire...

Aspects dynamiques

Principales forces agissant sur une particule solide interplanétaire (m, s, ρ)

Force gravitationnelle solaire F_G (prop. m / R^2)

Force F_r induite par pression du rayonnement solaire ($\beta = - F_r/F_G$ prop. $1/\rho s$)

Force de freinage par effet Poynting-Robertson

(composante de la pression de rayonnement tangente à l'orbite)

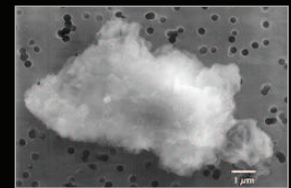
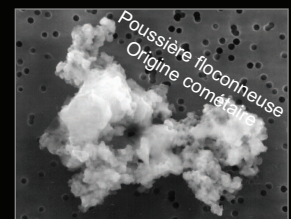


- ⇒ Très petites particules sub-micrométriques ou β -météoroïdes éjectées du système (orbites hyperboliques)
- ⇒ Petites particules tombant vers le Soleil (spirales) ; variation avec R liée à T et au temps
- ⇒ Echauffement et collisions vers le Soleil

Nuage zodiacal et évolution du système solaire...

Sources et puits

- Sources
- Poussières éjectées des comètes
 - Poussières formées par collisions entre astéroïdes
 - Particules des systèmes de planètes géantes
 - Petites particules interstellaires (en périphérie)
- Puits
- Echappement du système solaire
 - Chute sur le Soleil
 - (et sur les planètes, Terre $\approx 40\,000$ kg / jour)



Stationnarité du nuage zodiacal ?

- Observations photométriques depuis ≈ 60 ans
- Observations visuelles au moins depuis l'ancienne Egypte
- Beaucoup plus de poussières pour un flux de comètes, astéroïdes et trans-neptuniens plus intense (grand bombardement tardif...)

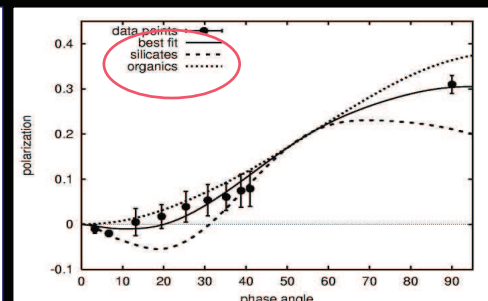
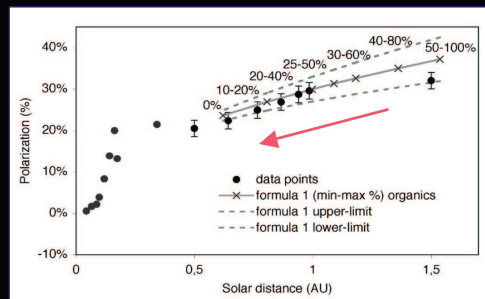
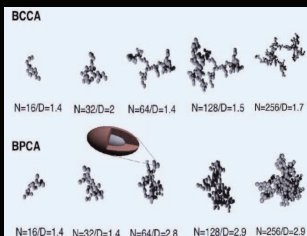
Origine prépondérante...

- Avant 1980, hypothèse cométaire (essaims météoritiques)
- Dans les années 80-90, hypothèse astéroïdale (IRAS, émission thermique de poussières issues de collisions entre astéroïdes de la ceinture principale)
- Aujourd'hui, retour à l'hypothèse cométaire...

Nuage zodiacal et évolution du système solaire

Simulations numériques de la diffusion lumineuse (Lasue et al., A&A, 2007)
 Grains compacts et agrégats fractals ; 'silicates' & 'organiques' absorbants
 Codes de diffusion lumineuse (Levasseur-Regourd et al., PSS 2007)

- ⇒ $0,1 < r_{\text{eff}} < 100 \text{ } \mu\text{m}$ (r_{eff}^{-3} sous $10 \text{ } \mu\text{m}$; $r_{\text{eff}}^{-4,4}$ au dessus)
- ⇒ 75-50% silicates & 25-50 % organiques ; au moins 20% d'agrégats
- ⇒ 50% à 100 % en masse pour la contribution cométaire
- ⇒ Décroissance $P(R)$ par dégradation thermique (ex. de polymères de HCN)
- ⇒ Silicates & organiques nécessaires pour $P(\alpha)$, ainsi que aussi pour $T(R)$



Étude propriétés orbitales et évolution dynamique (Nesvorny et al. ApJ., 2010)
 ⇒ Plus de 90 % des poussières d'origine cométaire (85% JFC)

Nuage zodiacal et évolution du système solaire



Stromboli, Sicile, avril 1997
M. Fulle, LZ et Hale-Bopp

Grand bombardement tardif

- Nuage zodiacal $\approx 10^4$ fois plus dense, avec noyaux cométaires chassés de la région Uranus-Neptune et actifs dans le système solaire interne
 - Grande abondance de molécules carbonées dans les poussières cométaires poreuses
 - Ablation plus bas dans une atmosphère planétaire pour des particules irrégulières ou agrégats que pour des sphères (probabilité survie ≈ 30 fois plus grande)
- ⇒ Vecteurs idéaux pour l'apport initial de composés carbonés sur les planètes telluriques ?

(Levasseur-Regourd et al., Origin of Life & Evolution of the Biosphere, 2006)

Lumière zodiacale, implications hors système solaire

Bruit d'avant-plan pour observations
depuis des grands télescopes
Observations de sources faibles,
en particulier étendues
Choix d'époques optimales,
estimation de l'avant-plan zodiacal

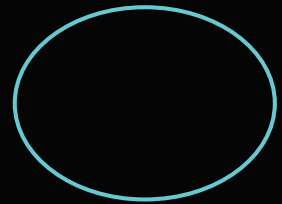
Contribution à la modélisation des
'lumières exo-zodiacales'

Sources de bruit pour la détection
d'exo-planètes

Modèles devant s'inspirer, mais
non copier, un modèle zodiacal

Disque de débris ou
nuage optiquement mince ?

Importance relative des diverses composantes ?
(particules venant de l'environnement de 'Jupiters chauds' ?)




J.D. Cassini

Les nouvelles découvertes ne sont pas si considérables dans leur commencement, qu'elles le deviennent dans la suite : la continuation des observations est ce qui les perfectionne, et ce qui en fait connoître la grandeur & les conséquences....

Remerciements

J. Blamont, R. Dumont, H. Fechtig, E. Hadamcik,
M. Hanner, J. Lasue, C. Leinert, I. Mann, J.B. Renard...



Merci
de votre attention

C/2006 P1 McNaught
M. Druckmuller, Argentina 2007