

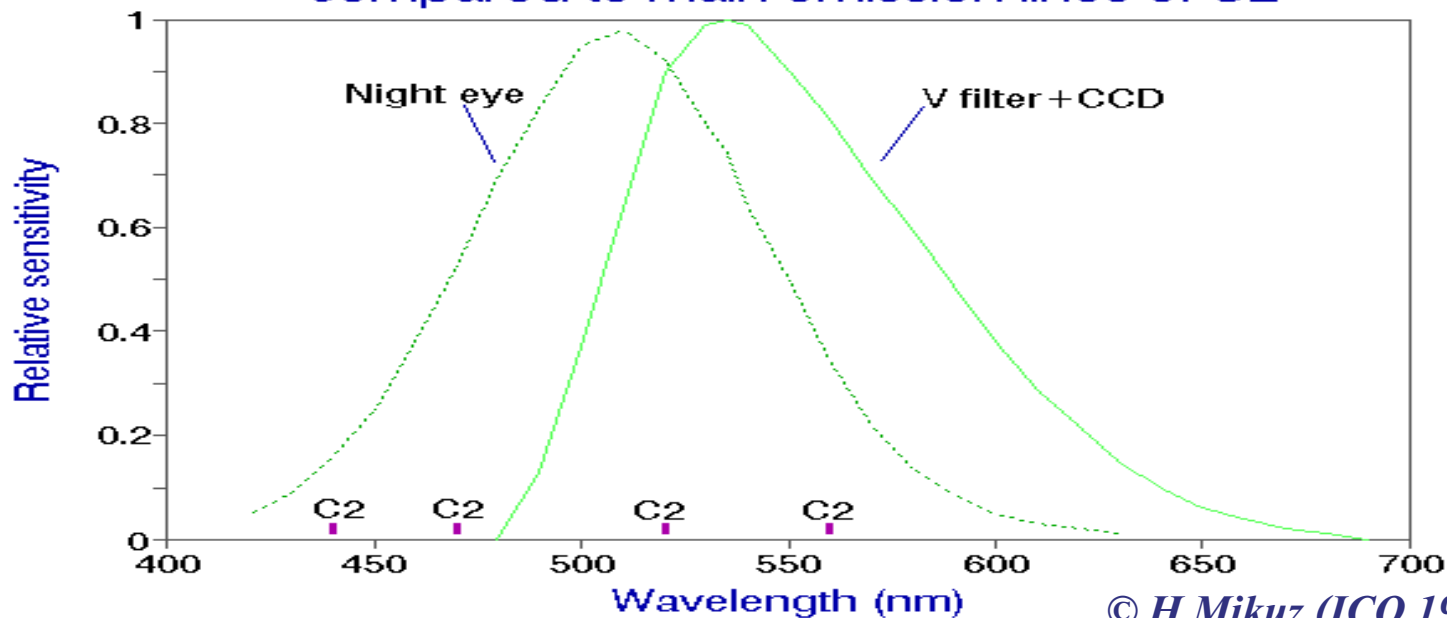
Spectroscopie cométaire

Nicolas Biver, Commission des comètes de la SAF et LESIA, Obs. Paris

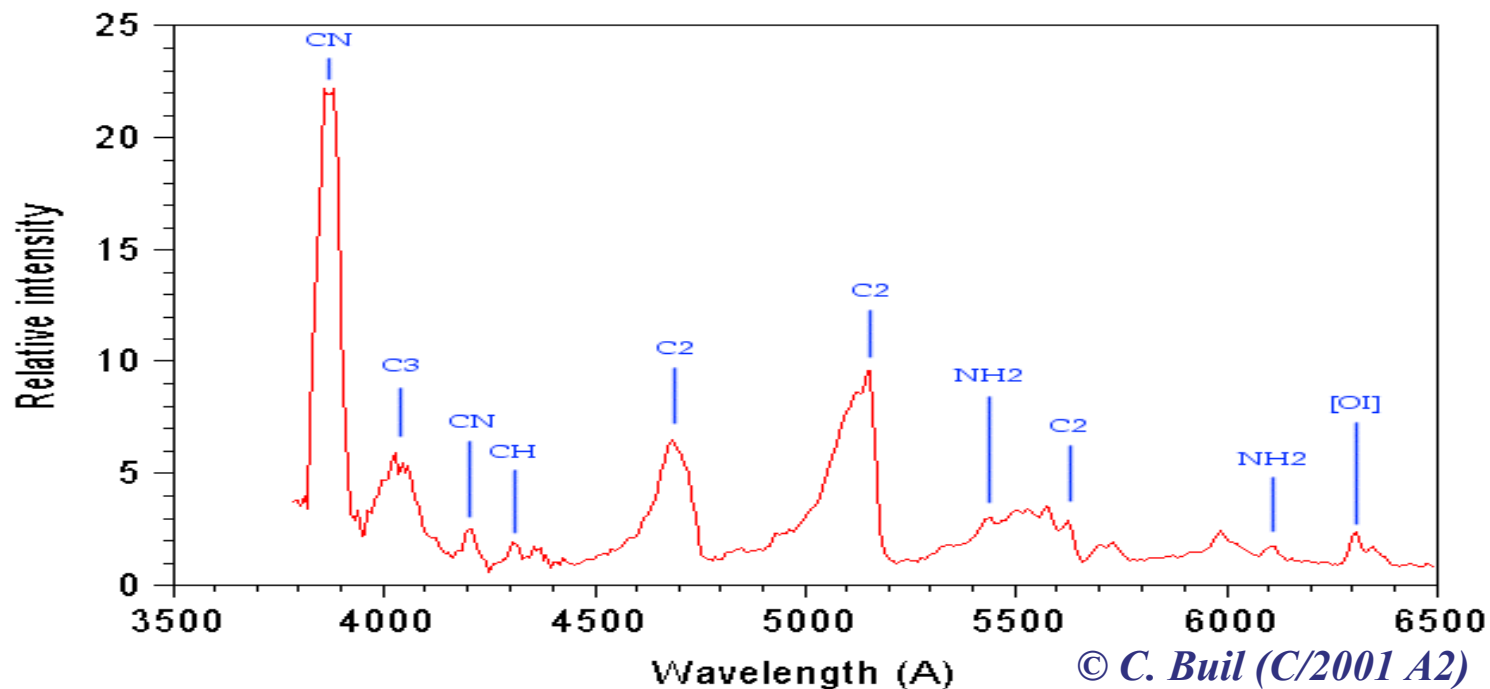
Molécules et radicaux cométaires

Analyse quantitative des spectres cométaires

Response of night eye and V filter+CCD compared to main emission lines of C2



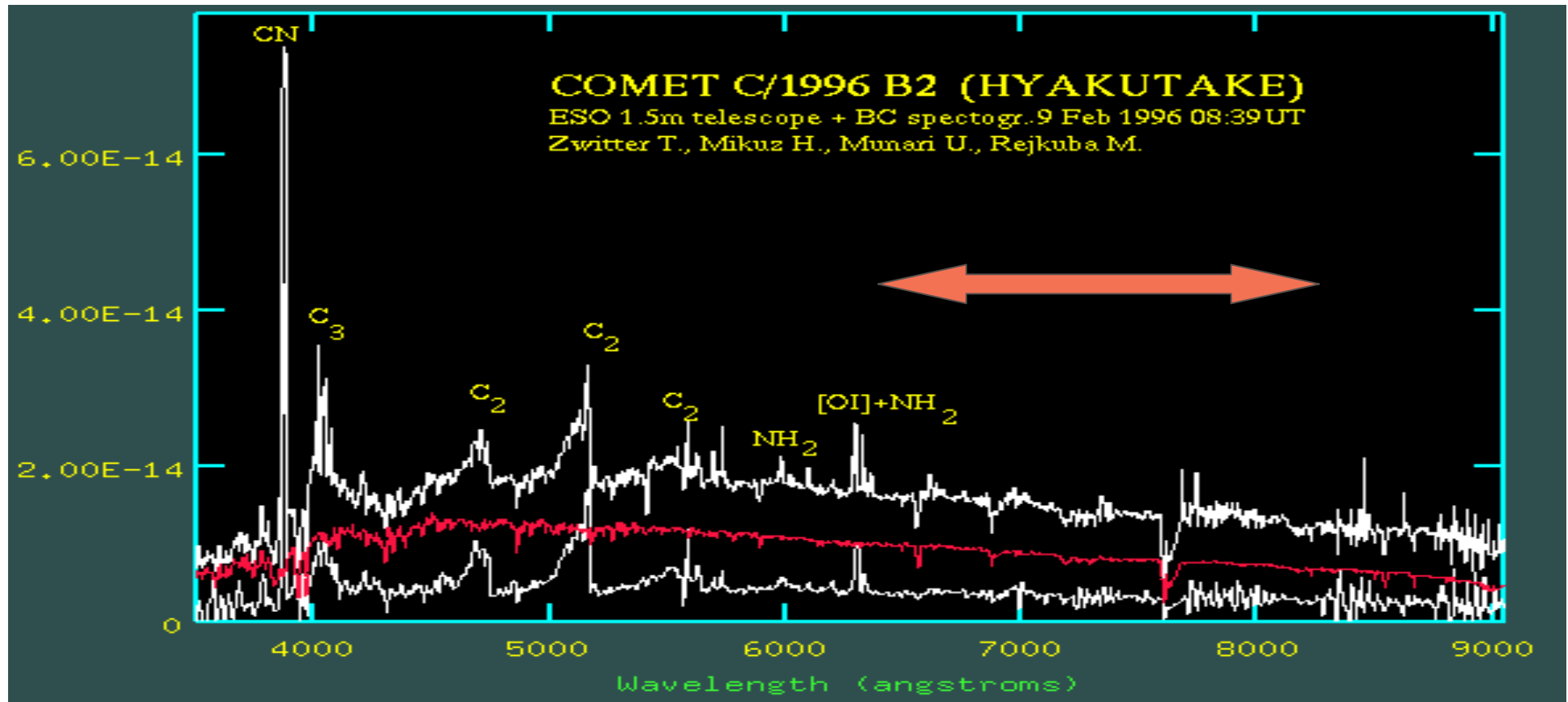
© H.Mikuz (ICQ 1994)



© C. Buil (C/2001 A2)

Problèmes de réponse spectrale:
filtrage nécessaire pour les mesures CCD de magnitude ou des poussières (A_p)

L'observation des poussières cométaires: Afp



Spectre cométaire = raies d'émission + spectre solaire réfléchi: diffusion de Mie et raies solaires (à éliminer!)

Photométrie "Afp" : mesurer de la quantité de poussières présente pour en déduire le taux de production de poussières par le noyau de la comète
Eviter les raies cométaires: filtres large bande dans le rouge

Spectroscopie cométaire

La Spectroscopie cométaire



Spectre visible de Hale-Bopp en mars 1997 © Marc Chapelet

Spectres cométaires amateur:

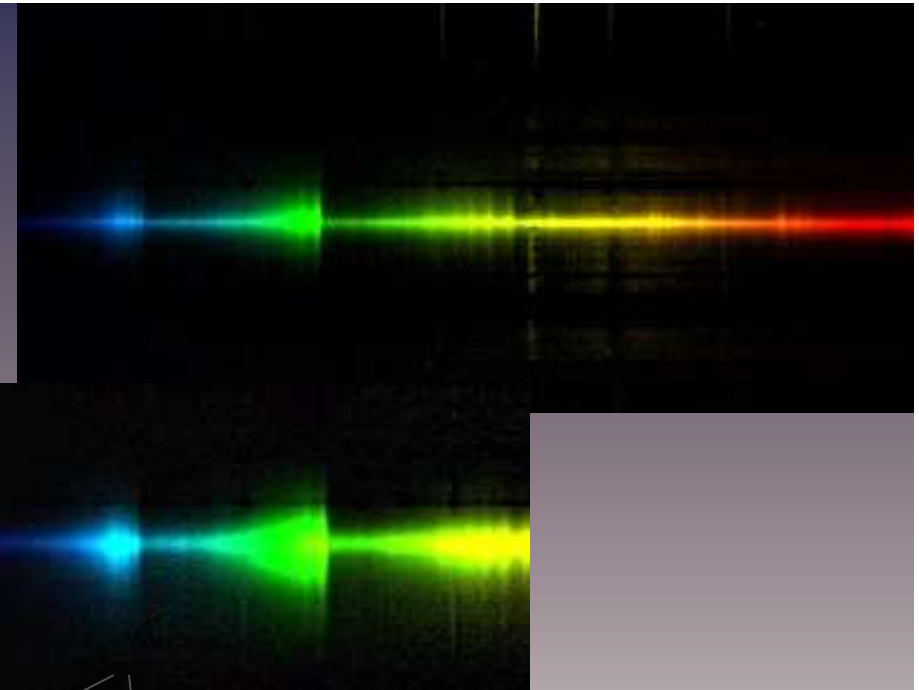
ex: C/2001 Q4 (NEAT)

14 et 15 mai 2004, Takahashi FS128mm,

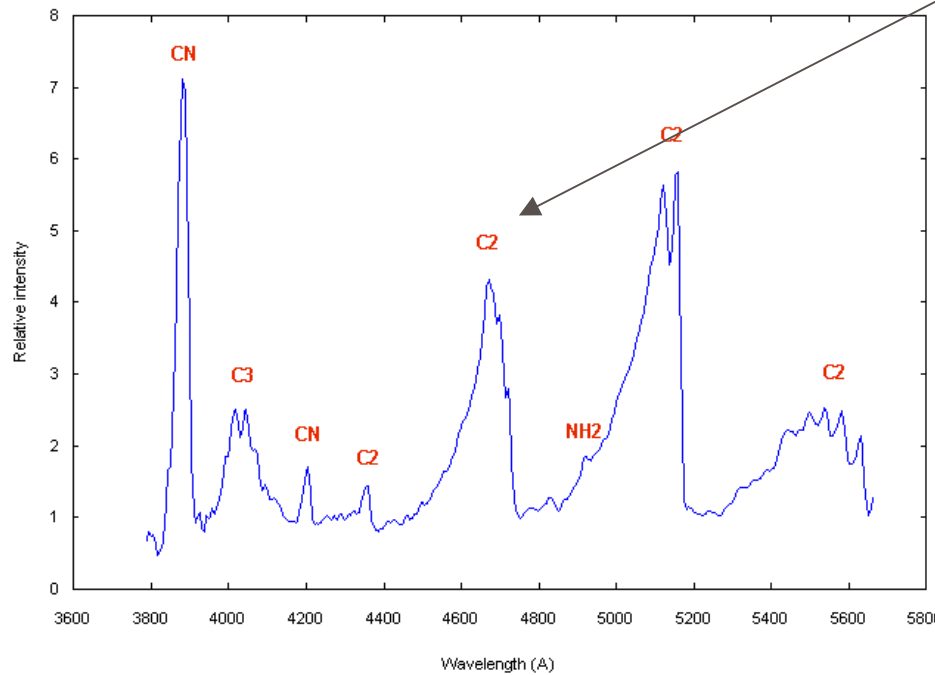
~5.6 Å/pixel 16/32min.

<http://astrosurf.com/buil/us/neat/q4.htm>

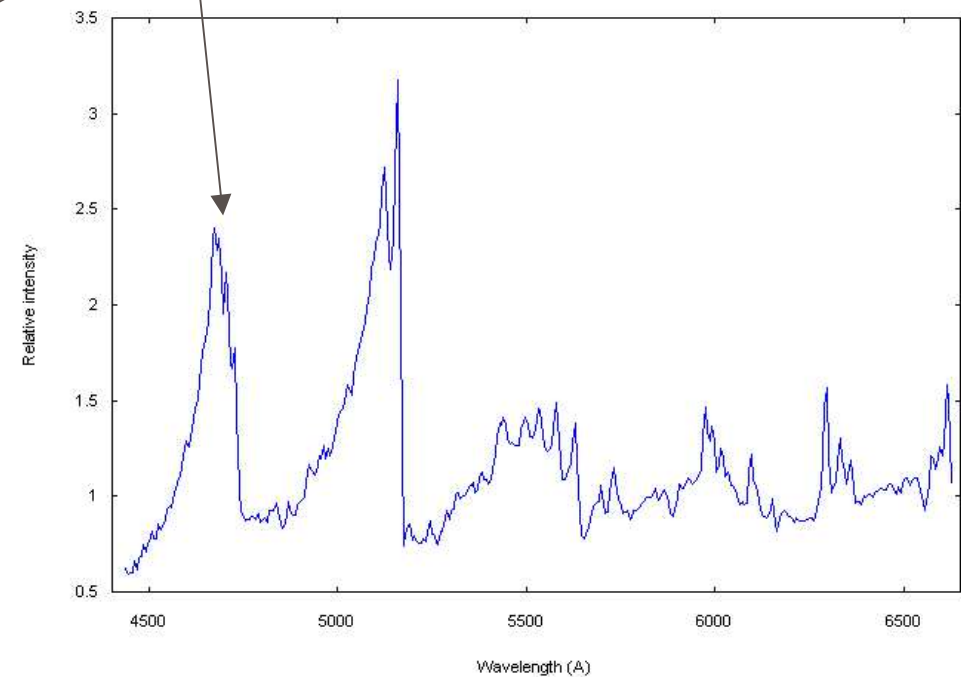
© Christian Buil



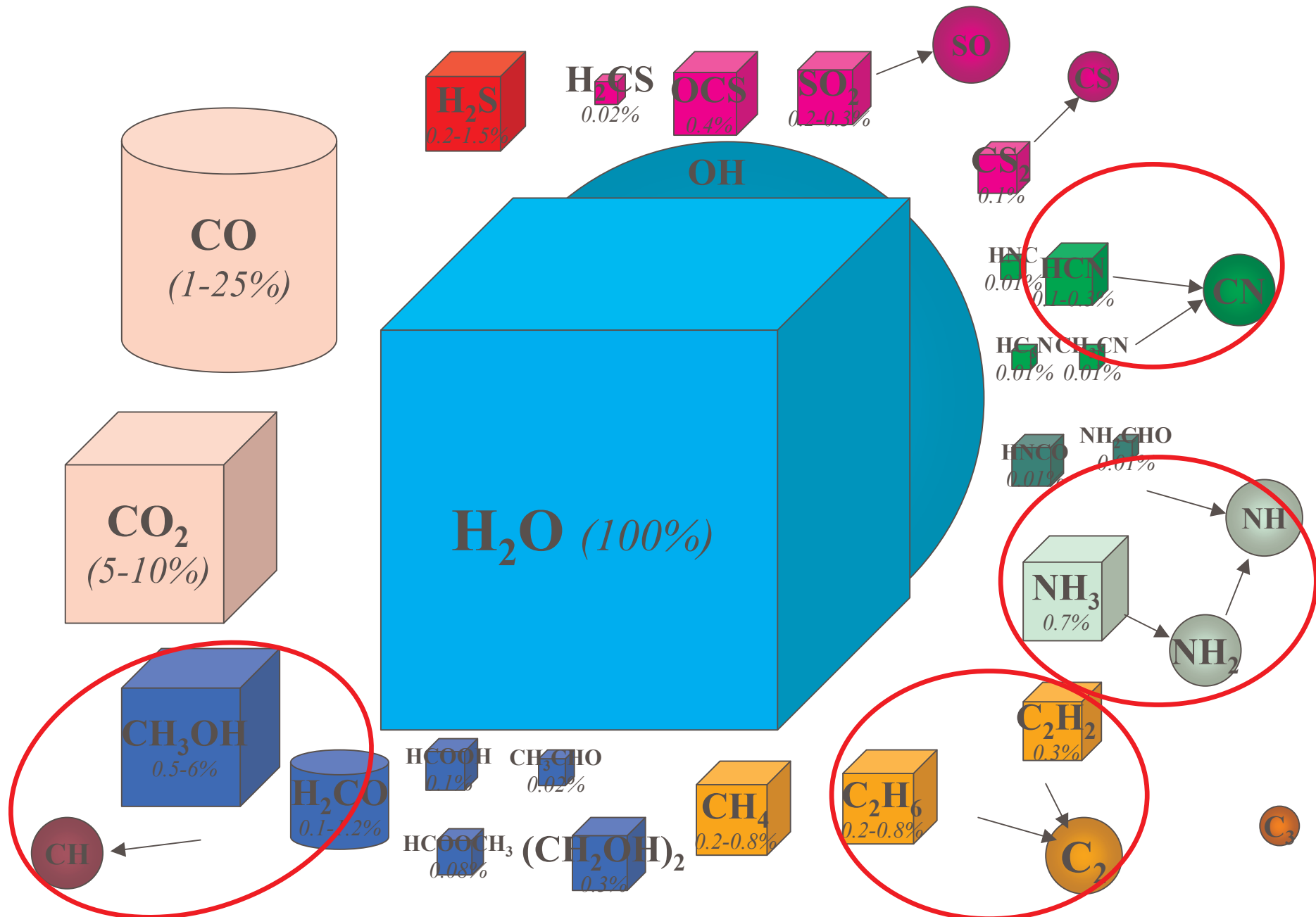
C/2001 Q4 (NEAT) - 15.867 / 05 / 2004 - FS-128 - Meris spectrograph - 5.50 Å/pixel



C/2001 Q4 (NEAT) - 14.879 / 05 / 2004 - FS-128 refractor - Meris spectrograph - 5.75 Å/pixel



Les molécules présentes dans l'atmosphère des comètes



Quel spectre de molécule observe-t-on dans les comètes?

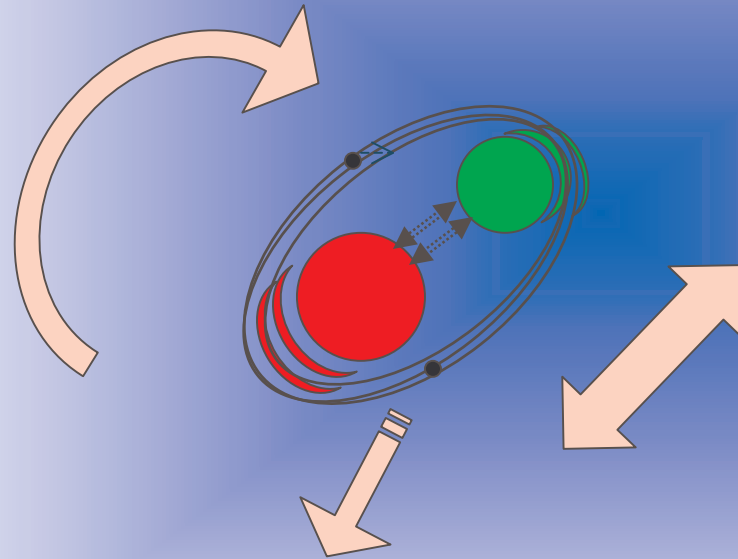
Spectre de rotation:

radio: $\lambda = 0.1$ à 10mm

Molécules mères non symétriques,...

Gaz froid (chevelures cométaires)

Raies résolues en vitesse et séparées



Spectre de vibration:

Infrarouge: $\lambda = 2$ à $10\mu\text{m}$

Molécules mères

non homonucléaires

(ex.: pas N_2 mais hydrocarbures)

Raies multiples, parfois confusion

(ex.: C-H à $3.4\mu\text{m}$), observées dans les fenêtres atmosphériques

Spectre électronique:

Visible - Ultraviolet: $\lambda = 100$ à 1000nm

Radicaux simples (produits de photodissociation des molécules mères), atomes et ions

Raies très nombreuses difficiles à séparer, groupées en bandes

Principales molécules présentes dans l'atmosphère des comètes

Molécule	Radio	Principales raies		Longueurs d'échelle	
		Infrarouge	Visible-UV	L_{parent} [à 1UA]	$L_{\text{dissoc.}}$
H ₂ O	0.54-0.17 mm	2.7 6.3 μm , 1.94 2.95 4.65 μm	-	-	70000 km
OH	18 cm	2.87 3.04 3.28 μm	0.30 μm	25000 km	160000 km
CO ₂	-	4.25 μm	(CO cameron: 200nm)-	-	430000 km
CO	2.6-0.65 mm	4.67 μm	142-160 nm	0 ou+ km	1300000 km
C ₂ H ₂	-	3.03 μm	-	-	60000 km
C ₂ H ₆	-	3.35 μm	-	-	75000 km
C ₂	-	-	0.45-0.56 μm	20000 km	70000 km
HCN	3.4-0.4 mm	3.0 μm	-	-	57000 km
CN	1.3 mm	4.90 μm	0.388 μm	20000 km	200000 km
NH ₃	13 mm	3.00 μm	-	-	5500 km
NH ₂	-	3.23 μm	0.52-0.74 μm	5000 km	10000 km

(en italique: raies non observables du sol)

Principales raies cométaires en visible

Molécule	Transition (électronique - vibration)		Longueur d'onde pic largeur		\mathcal{L}/\mathcal{N} à 1UA [10^{-20} W/moléc]
OH	$A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$	$v=0-0$	306.4nm	+5nm	0.015 à 0.083
	$A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$	$v=1-1$	312.2nm	+6nm	0.001 à 0.004
	$A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$	$v=0-1$	346.8nm		0.00005 à 0.0003
CN	$B^2\Sigma^+ - X^2\Sigma^+$	$\Delta v=0$	388.3nm	-4nm	2.5 à 4.5
	$B^2\Sigma^+ - X^2\Sigma^+$	$v=0-1$	421.5nm	-4nm	≈ 0.2
	$A^2\Pi_i - X^2\Sigma^+$	$v=1-0$	914.1nm	+15nm	≈ 0.7
C_3	$A^1\Pi_u - X^1\Sigma_g^+$	$v=000-000$	405.2nm	± 17 nm	10.0
CH	$A^2\Delta - X^2\Pi_r$	$v=0-0$	430.5nm	± 5 nm	0.92
C_2	$d^3\Pi_g - a^3\Pi_u$	$\Delta v=+1$	473.7nm	-20nm	2.40
	$d^3\Pi_g - a^3\Pi_u$	$\Delta v=0$	516.5nm	-30nm	4.50
	$d^3\Pi_g - a^3\Pi_u$	$\Delta v=-1$	563.6nm	-30nm	2.1
	$A^1\Pi_u - X^1\Sigma_g^+$	$\Delta v=+1$	1010.0nm	-20nm	0.13
NH	$A^3\Pi_i - X^3\Sigma^-$	$\Delta v=0$	336. nm	± 5 nm	0.49 à 0.76
NH ₂	$\tilde{A}^2A_1 - X^2B_1$	$v=0,12,0-0,0,0$	515. nm	~ 10 nm	0.551
	$\tilde{A}^2A_1 - X^2B_1$	$v=0, 9,0-0,0,0$	600. nm	~ 10 nm	0.313
	$\tilde{A}^2A_1 - X^2B_1$	$v=0, 8,0-0,0,0$	630. nm	~ 10 nm	0.534
	$\tilde{A}^2A_1 - X^2B_1$	$v=0, 7,0-0,0,0$	665. nm	~ 10 nm	0.175

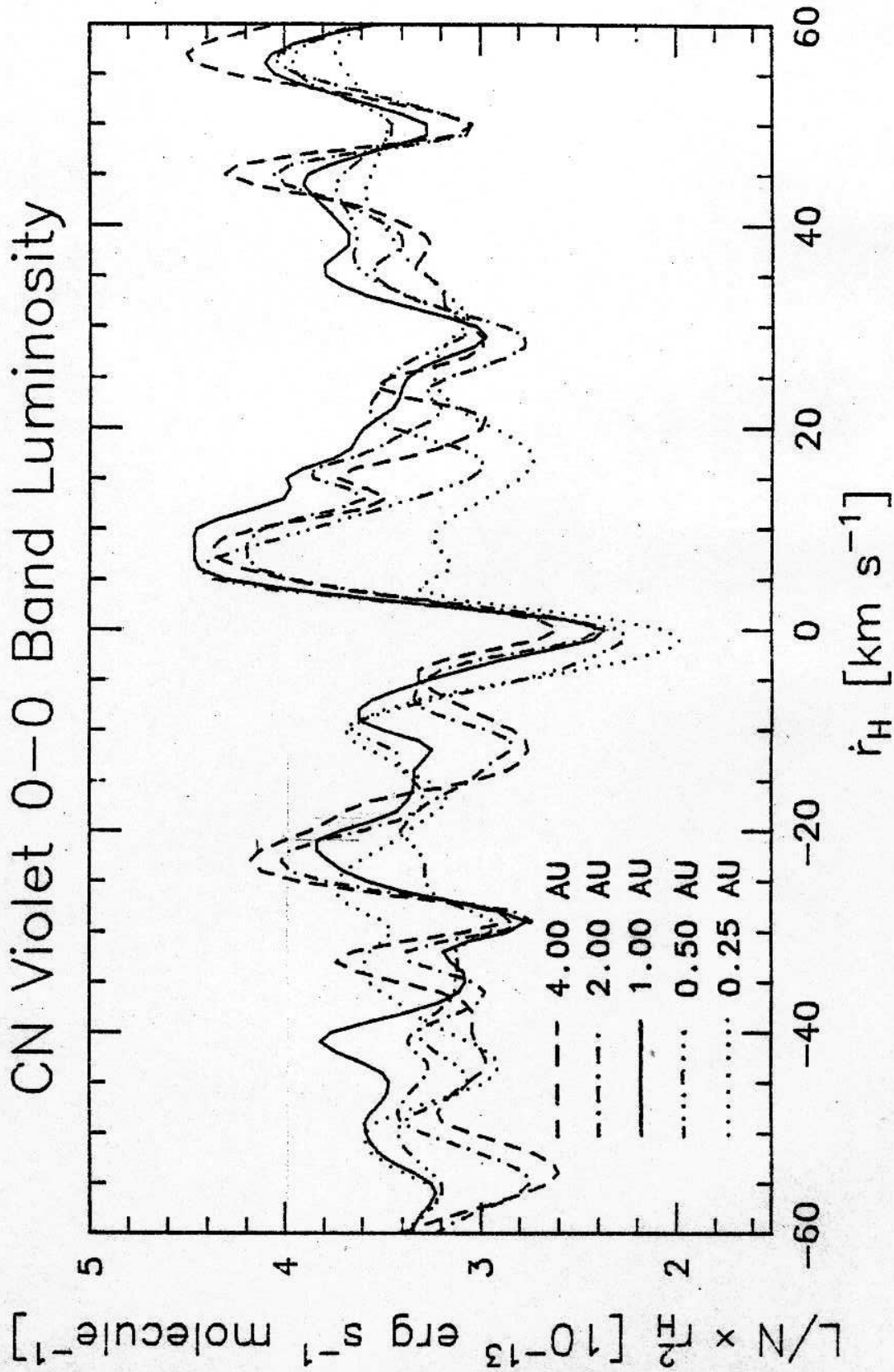
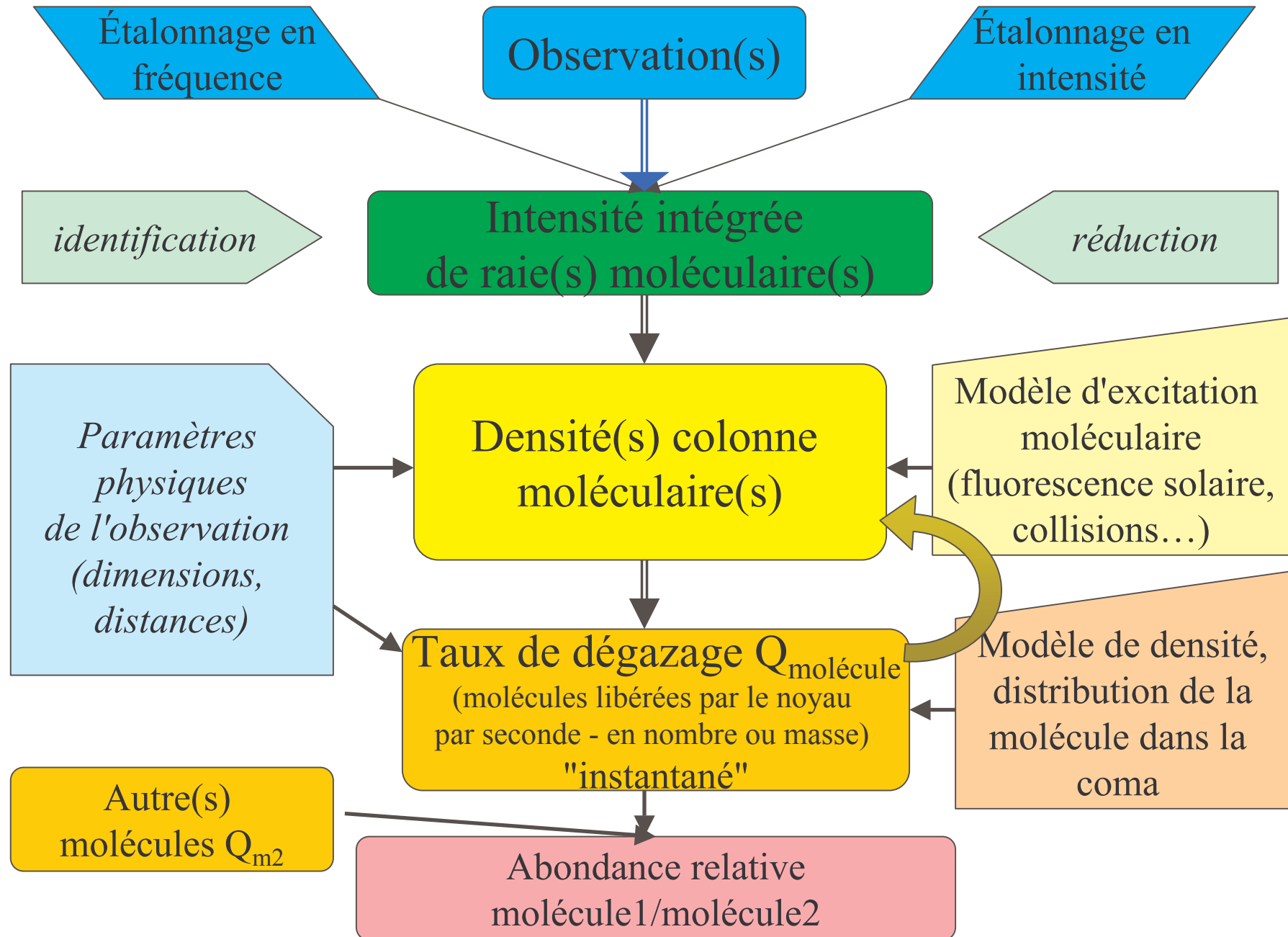


Fig. 5-1 Fluorescence efficiency of the violet 0-0 band of CN, normalized to $r_H = 1 \text{ AU}$, as a function of heliocentric velocity at distances of 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, and 4.0 AU.

Principales raies cométaires en visible: les ions

ion	Transition (électronique - vibration)		Longueur d'onde		Abondance relative		
			pic	largeur	dans la chevelure à 10 ⁴ km 10 ⁵ km 10 ⁶ km		
OH ⁺	A ³ Π _i - X ³ Σ ⁻	v= 1 - 0	336nm	-4nm	0.0003%	0.2%	600%
	A ³ Π _i - X ³ Σ ⁻	v= 0 - 0	362nm	-5nm	(par rapport à H ₂ O)		
	A ³ Π _i - X ³ Σ ⁻	v= 0 - 1	403nm	-4nm	0.1%	3%	
(par rapport aux neutres)							
CO ⁺	A ² Π _i - X ² Σ ⁺	v= 4 - 0	379nm	±1nm	0.0003%	0.3%	30%
	A ² Π _i - X ² Σ ⁺	v= 3 - 0	401nm	±1nm	(par rapport à H ₂ O)		
	A ² Π _i - X ² Σ ⁺	v= 2 - 0	426nm	±1nm	0.2%	0.2%	
	A ² Π _i - X ² Σ ⁺	v= 1 - 0	455nm	±2nm	(par rapport aux neutres)		
	A ² Π _i - X ² Σ ⁺	v= 2 - 1	470nm	±2nm			
	A ² Π _i - X ² Σ ⁺	v= 0 - 1	549nm	±3nm			
H ₂ O ⁺	A ² A ₁ - X ² B ₁	v=0,8,0-0,0,0	616nm		0.0020%	0.5%	2%
	A ² A ₁ - X ² B ₁	v=0,3,0-0,0,0	620nm		(par rapport à H ₂ O)		
	A ² A ₁ - X ² B ₁	v=0,2,0-0,0,0	670nm		0.4%	0.01%	
(par rapport aux neutres)							

Exploiter des spectres cométaires



Exploiter des spectres cométaires

Excitation des molécules: fluorescence solaire

(+ collisions dépendant de la distance au noyau r pour les niveaux de rotation)

Les molécules émettent un rayonnement par désexcitation spontanée après absorption de photons solaires ayant permis le peuplement des niveaux de vibration et électroniques.

⇒ énergie rayonnée par molécule: " \mathcal{L}/\mathcal{N} " (ou g-facteur) en W/molécule

(Calculé, tabulé, dépend de la distance r_h au soleil (en $1/r_h^2$) et parfois de la vitesse de la comète par rapport au Soleil)

Flux intégré mesuré (W/m^2)

Densité colonne:

$$N(\rho) = (4\pi\Delta^2 F(\rho)) / (S \cdot \mathcal{L}/\mathcal{N}(r_h))$$

Distance Δ à la Terre (m)

Section de comète observée (m^2)

Distribution de densité du gaz: modèle de Haser

pour une molécule "mère" $n(r) = Q_{\text{molec}} / (4\pi r^2 v_{\text{exp}}) \cdot \exp(-r/L_d)$ (v_{exp} : vitesse d'expansion du gaz)

pour une molécule "fille" $n(r) = Q_{\text{molec}} / (4\pi r^2 v_{\text{exp}}) \cdot L_d / (L_p - L_d) \cdot (\exp(-r/L_p) - \exp(-r/L_d))$

Densité colonne intégrée sur la ligne de visée:

au paramètre d'impact ρ :
$$N(\rho) = Q_{\text{molec}} / (2\pi v_{\text{exp}}) \cdot L_d / (L_p - L_d) \cdot (1/\rho) \int_{(\rho/L_p)}^{(\rho/L_d)} K_0(x) dx$$

K_0 : fonction de Bessel modifiée, $\int_0^\infty K_0(x) dx = \pi/2$

Exemple: exploitation d'une observation de CN à 388 nm

Observation de C/1995 O1 (Hale-Bopp) le 19 déc. 1997 à l'ESO

(Extrait de l'article Rauer et al. A&A 397, 1109-1122, 2003)

Intensité mesurée: Pic à $\approx 23 \cdot 10^{-17} \text{ erg cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{\AA}^{-1} = 2.3 \cdot 10^{-19} \text{ Wm}^{-2}\text{\AA}^{-1}$
(cf figures) Flux intégré: $\mathbf{F = 5.6 \cdot 10^{-18} \text{ Wm}^{-2}}$ (*largeur $\approx 25\text{\AA}$*)

Données physiques liées à l'observation:

$\Delta = 3.63 \text{ UA}, \quad r_h = 3.78 \text{ UA}, \quad v_{\text{hélio}}(\text{comète}) = +18.7 \text{ km/s}$

Section $S = 2.4''$ (largeur fente) x $0.82''$ (ligne de 1 pixel) $\Rightarrow S = 1.34 \cdot 10^{13} \text{ m}^2$

Spectre extrait à $\rho = 80000 \text{ km}$ du "noyau"

Autres informations:

$v_{\text{exp}} = 650 \text{ m/s}$ (mesures radio)

$L_p(\text{CN}, r_h) \approx 300000 \text{ km} \quad L_d \gg L_p \gg \rho$

(estimées sur de telles observations à différents ρ)

Tables $\Rightarrow L/N(\text{CN } \Delta v=0, r_h = 3.78, v_{\text{hélio}} = +18.7) = 1.08 \times 3.08 \cdot 10^{-20} / 3.78^2$
 $= 2.33 \cdot 10^{-21} \text{ W/molec}$

Réduction: $L = 4 \pi \Delta^2 F = 2.1 \cdot 10^7 \text{ W} \Rightarrow \mathbf{N(\rho = 80000 \text{ km}) = L / (S \cdot L/N) = 6.7 \cdot 10^{14} \text{ m}^{-2}}$

$N(\rho = 80000 \text{ km}) \approx Q_{\text{CN}} / (2\pi v_{\text{exp}} \rho) \int_0^{0.27} K_0(x) dx \approx 0.7 Q_{\text{CN}} / 3.3 \cdot 10^{11}$

$\Rightarrow \mathbf{Q_{CN} \approx 3.1 \cdot 10^{26} \text{ molec./s}}$