



Observer la coma pour :

- comprendre la composition du noyau
- cinématique du dégazage
- masse perdue, forces non-grav.
- champ magnétique

- 
- La radioastronomie est complémentaire des autres techniques - optique, UV, IR
  - signatures spectrales de nombreuses molécules (voir le M1 S)
  - haute résolution spectrale

## Pourquoi étudier les comètes?

- “ reliques ” du système solaire, datant de l'époque de sa formation
- elles n'ont pas subi de changement majeur, chimiquement ou physiquement
- réservoirs des conditions initiales du système solaire

### problèmes à résoudre?

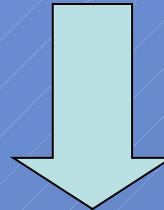
- composition chimique (2 belles douzaines de molécules, mesurées dans 2 belles comètes)
- constitution physique (faible densité, porosité, état de surface...)
- corrélation entre propriétés des comètes et lieu de formation ?

### Les outils

- le contenu moléculaire est mesuré dans la coma par spectroscopie radio et IR.
- les instruments radio actuels
  - dm: OH - Nançay, Arecibo, VLA
  - cm: Effelsberg (NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, tout juste détecté dans Hale-Bopp)
  - mm IRAM: 30m et PdBI
  - sub-mm JCMT, CSO

# Observations radio

*En 1973 à Nançay:  
le radical OH (18cm)  
dans la comète Kohoutek*



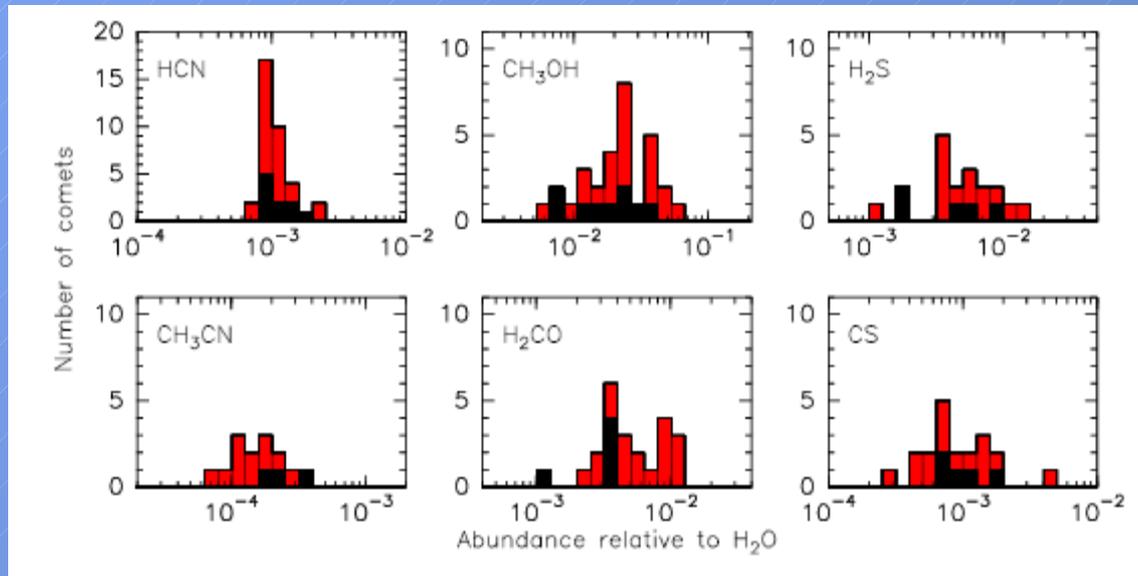
*plus de 100 maintenant...*

*OH provient de la photolyse de la molécule d'eau  
=> mesure de l'activité gazeuse*

# Les molécules sont vues principalement dans le mm/sub-mm et l'infrarouge

molécule	abondance relative	technique d'observation
eau H <sub>2</sub> O	100	IR, radio
monoxyde de carbone CO	23	radio, IR, UV
dioxyde de carbone CO <sub>2</sub>	6	IR
méthane CH <sub>4</sub>	0,6	IR
acétylène C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0,1	IR
éthane C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,3	IR
méthanol CH <sub>3</sub> OH	2,4	radio, IR
formaldéhyde H <sub>2</sub> CO	1,1	radio
éthylène glycol HOCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH	0,25	radio
acide formique HCOOH	0,09	radio
éthanal CH <sub>3</sub> CHO	0,02	radio
formiate de méthyle HCOOCH <sub>3</sub>	0,08	radio
ammoniac NH <sub>3</sub>	0,7	radio, IR
cyanure d'hydrogène HCN	0,25	radio, IR
isocyanure d'hydrogène HNC	0,04	radio
cyanure de méthyle CH <sub>3</sub> CN	0,02	radio
cyanoacétylène HC <sub>3</sub> N	0,02	radio
acide isocyanique HNCO	0,1	radio
formamide NH <sub>2</sub> CHO	0,015	radio
sulfure d'hydrogène H <sub>2</sub> S	1,5	radio
monoxyde de soufre SO	0,3	radio
dioxyde de soufre SO <sub>2</sub>	0,2	radio
oxysulfure de carbone OCS	0,4	radio, IR
disulfure de carbone CS <sub>2</sub>	0,2	UV, radio
thioformaldéhyde H <sub>2</sub> CS	0,02	radio
disoufre S <sub>2</sub>	0,005	UV

# Diversité chimique des comètes



- corrélation entre propriétés des comètes et lieu de formation ?

Crovisier et al. 2009, Earth, Moon, and Planets

Abondances moléculaires relative à l'eau

observations radio de ~30 comètes.

Noir: Famille de Jupiter

Rouge : Nuage de Oort (longue période + Halley-type)

# Le suivi radio de molécules dans Hale-Bopp

SEST, IRAM, Nançay

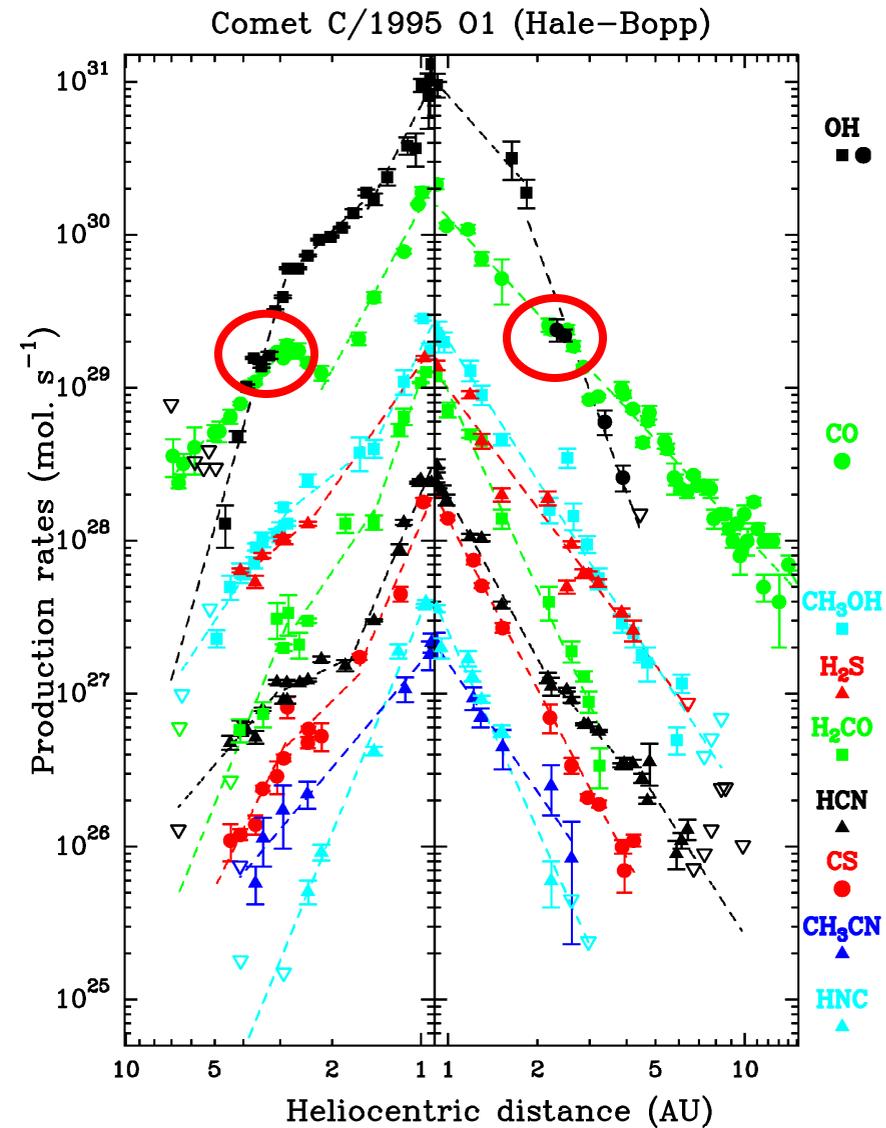
Activité des comètes

- proches: eau

- lointaines: CO

-> physique du dégazage

Biver et al. 2002, Earth, Moon, and Planets



# *Les images radio de comètes*

- *le radical OH au VLA, dans les comètes:*

*1P/Halley, C/1986 P1 (Wilson), C/1995 O1 (Hale-Bopp)*

- *CO dans Hale-Bopp au PdBI, poussière dans 17P/Holmes*

- *cartes « single dish »*

# OH 18-cm dans 1P/HALLEY au VLA

Config. D intégration: 2 fois 9 heures

No. 1, 1986

OH DISTRIBUTION AROUND COMET HALLEY

L35

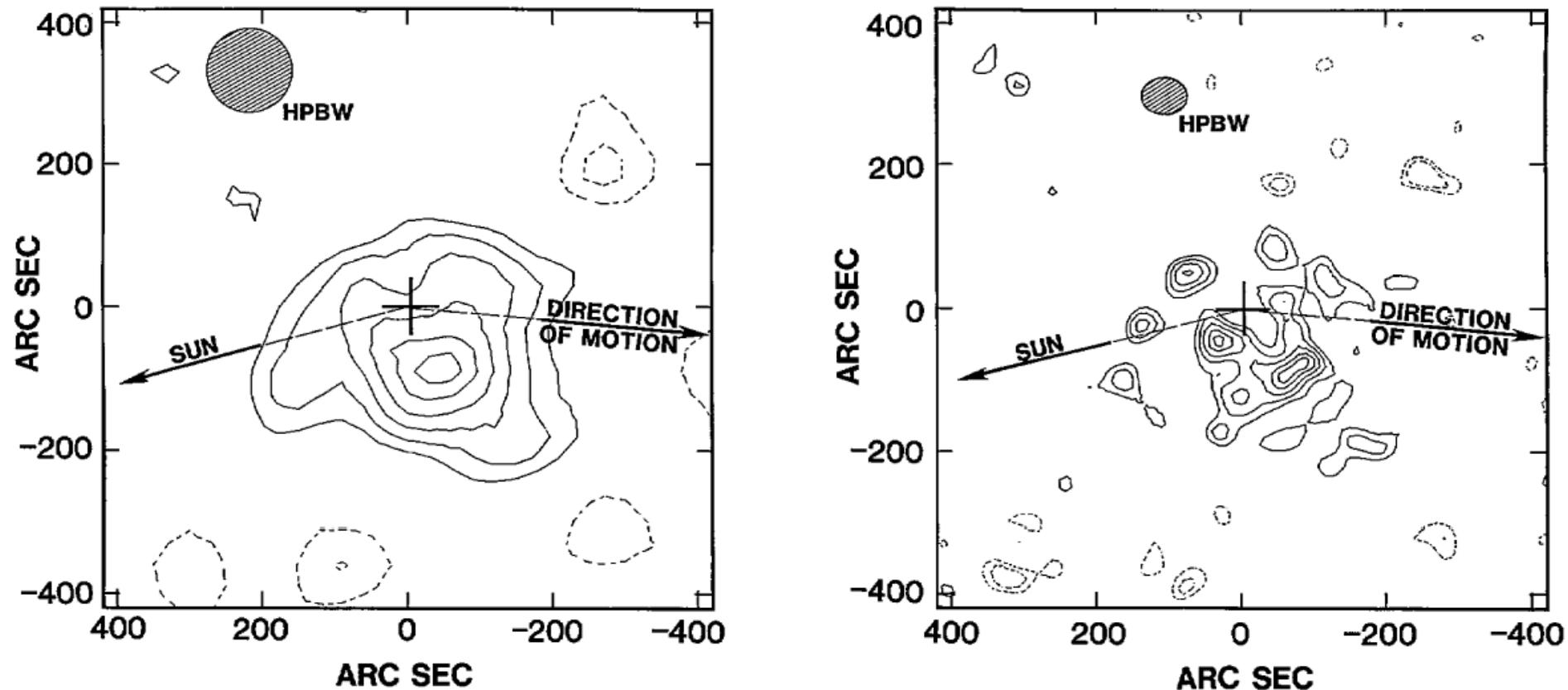
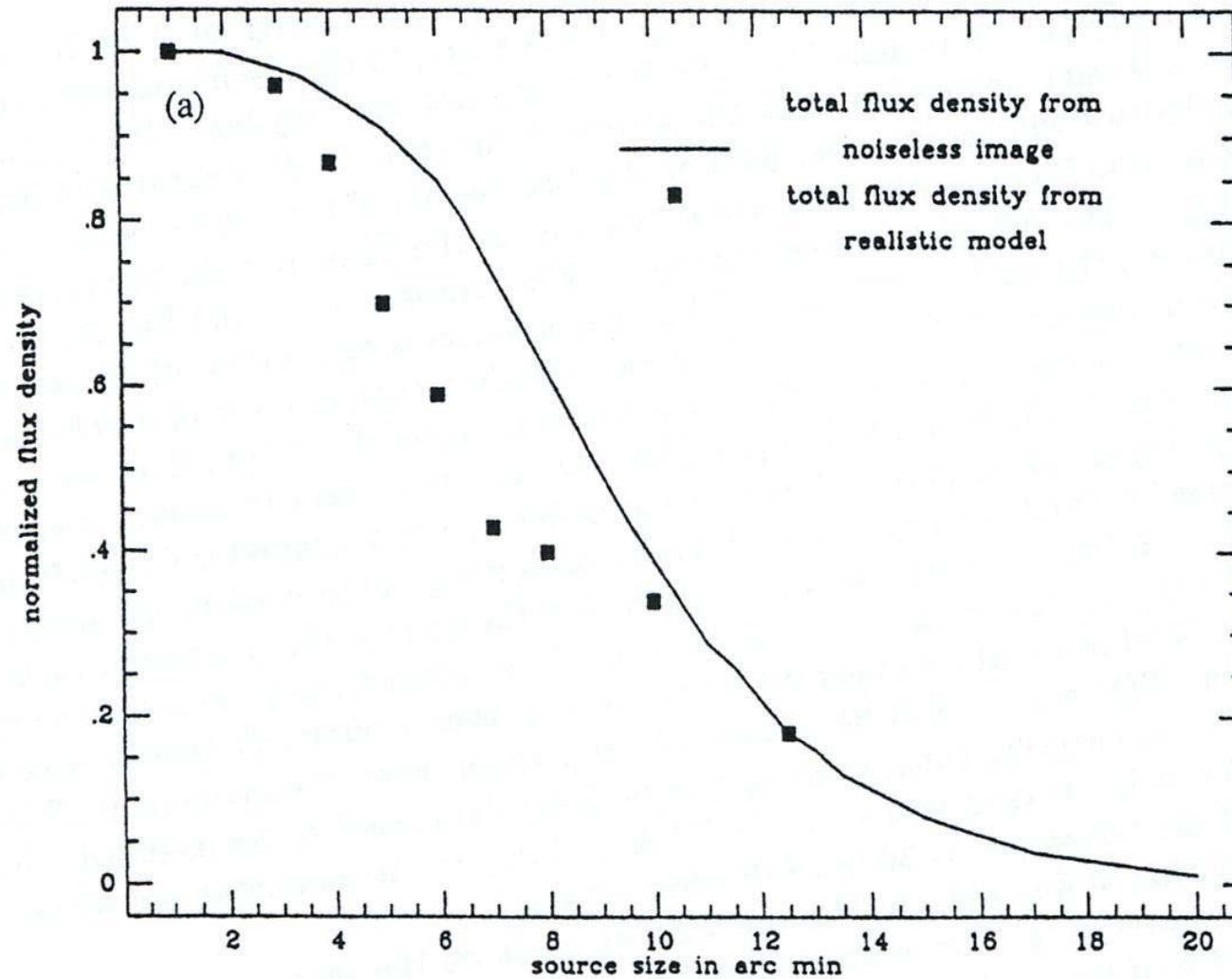


FIG. 2.—A low- (120"; left side) and high- (50"–60"; right side) resolution image of the OH emission from comet Halley. The cross in the center indicates the position of the nucleus. An angular size of 3' is approximately  $10^5$  km at the comet. Contour levels for the 120" image are -7.8, -4.9, 4.9, 7.8, 10.8, 13.7, 16.7, 16.7, 18.6 mJy per beam; for the 60" image they are -6.0, -4.4, 4.4, 6.0, 7.7, 9.3, 10.4 mJy per beam. Dashed contours indicate negative values.

de Pater et al., 1986, Ap. J. 304, L33

# FOV (VLA antenna @ 18 cm) ~ 25 arcmin Interferometer in the D configuration



de Pater, Palmer, Snyder, 1991, Ap&SS Lib. 167, 175

## Simulation Plotnikov, Colom (2008)

Basée sur C/Holmes, ramenée à 1 UA de la Terre

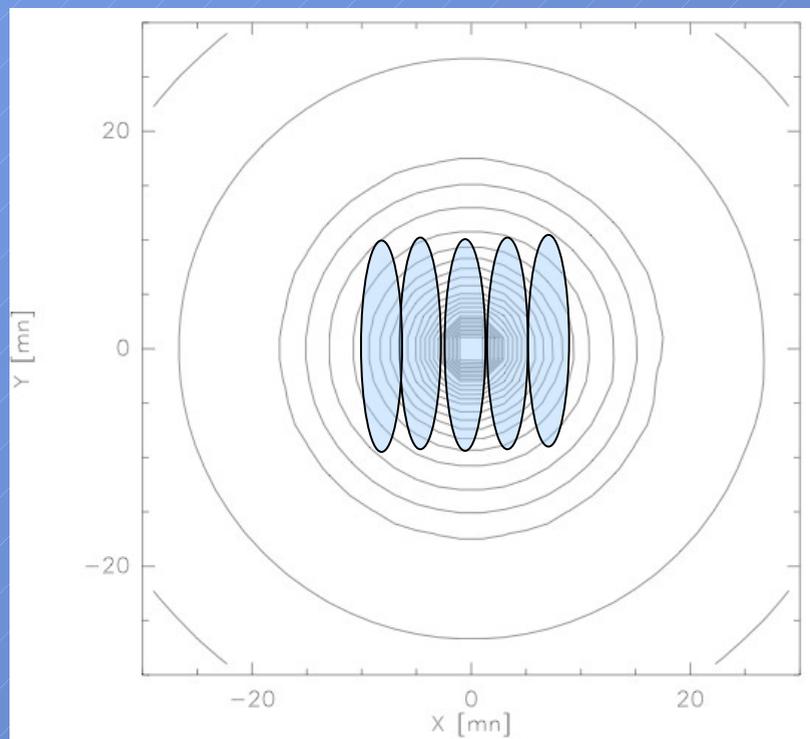
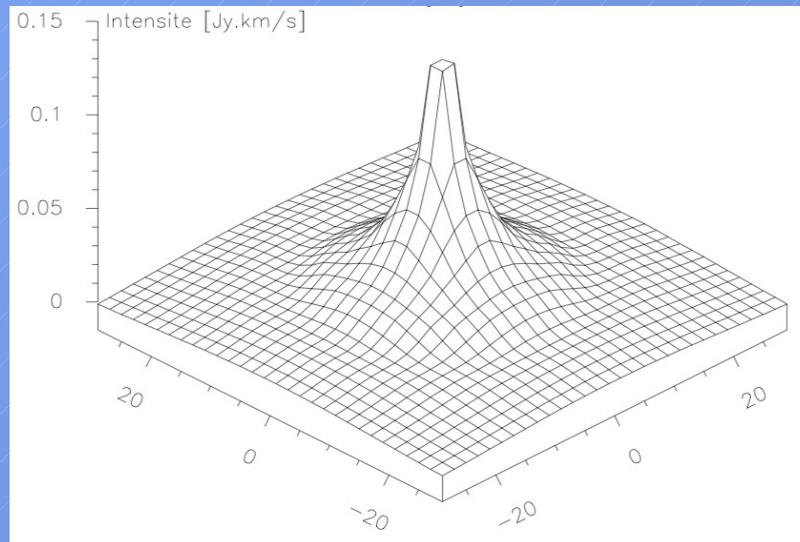
Intérêt des cartes:

- amélioration significative du calcul du taux de production de l'eau ( $\tau_{OH}$ ,  $Rq$ )
- Anisotropies/jets

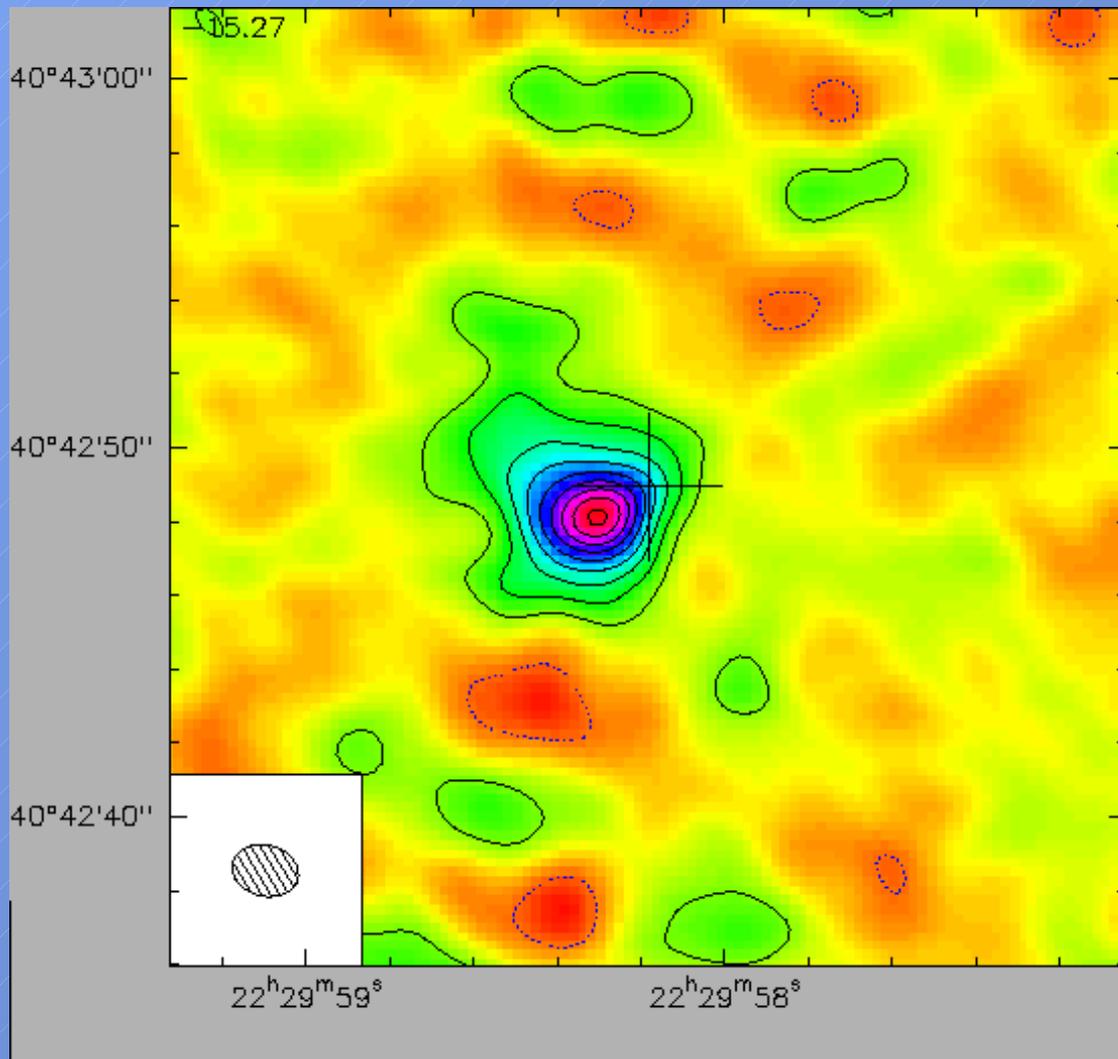
Astres variables, ne pouvant être aisément cartographiés en 1h (RT)

Besoins:

- multibeam (projet FAN)
- interférométrie avec espacements nuls



## CO dans Hale Bopp au PdBI (1997)



*évidence d'un jet fort, tournant  
modélisation 3D des visibilité*

*détermination:*

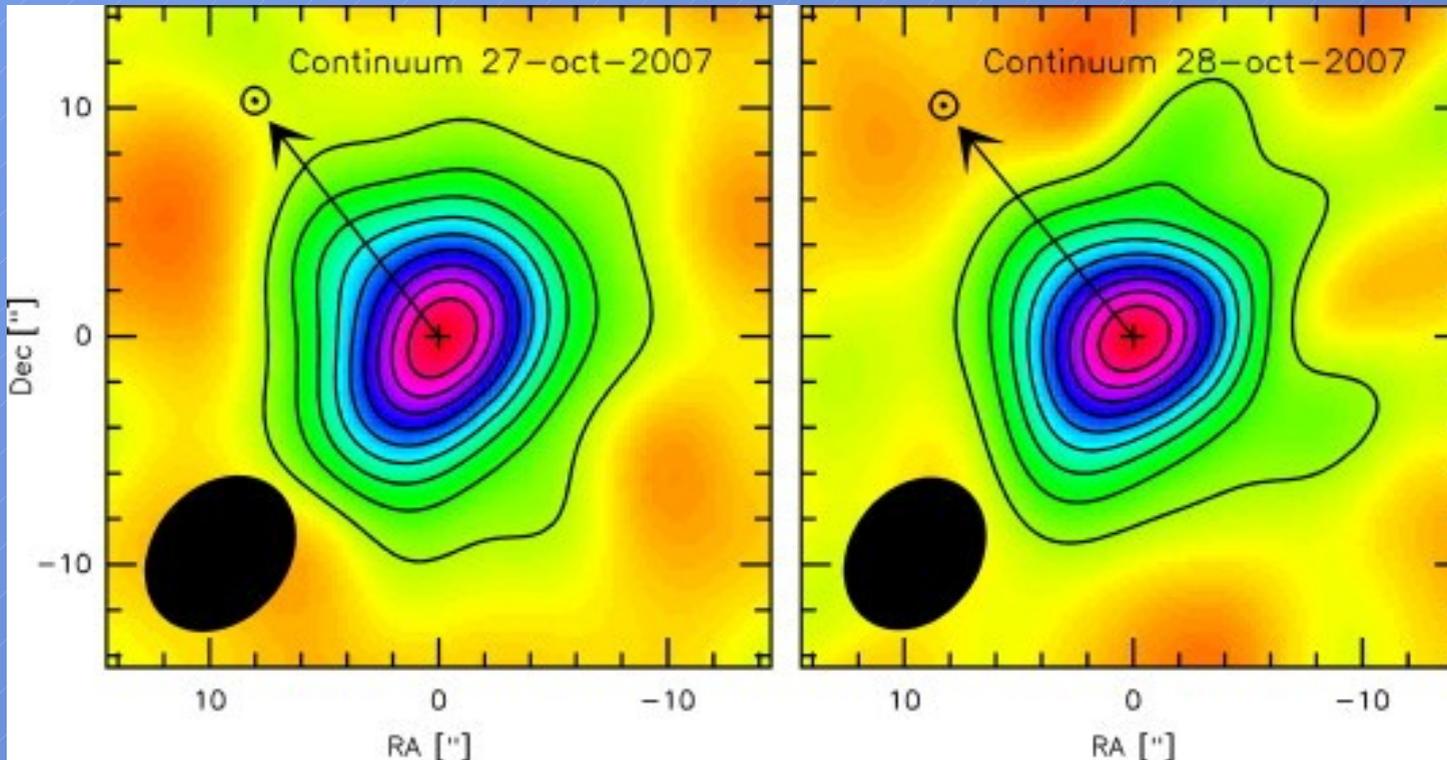
*axe de rotation*

*période*

*source du jet sur l'noyau*

**F. Henry et al, EMP, 2002 (thèse en 2003)  
Bockelée-Morvan et al., 2009, A&A, sous  
presse**

## Poussière dans 17P/Holmes au PoBI (2007)



**Carte continuum, 90 GHz, 27 & 28 oct. 2007**

Boissier et al. 2008, Asteroids, Comets, Meteors  
Crovisier et al. 2009, Planetary and Space Science 57

## OH, les comètes et SKA

- les cartes permettent de mieux mesurer le taux production d'eau:
  - contraindre l'échelle de longueur de OH, et confronter à la modélisation
  - déterminer le " quenching " qui affecte les conditions d'excitation de OH
- établir et quantifier les éventuels dégazages anisotropes (spatial, spectral)
- cartographier le champ magnétique dans la coma (effet Zeeman)
- composante électronique de la coma ionisée : scintillation de radio sources

## Quel précurseur de SKA pour les comètes?

- les signaux les plus forts proviennent des lignes de base courtes
- l'espacement nul est nécessaire (coma complète)
- grande dynamique dans l'image ( $> 10^4$ )

### MeerKAT:

- surface =  $8000 \text{ m}^2$  (NRT =  $7000 \text{ m}^2$ )
- $T_{\text{sys}} = 30 \text{ K}$
- FoV =  $1 \text{ deg}^2$  @ 1.4 GHz
- imaging dynamic range = 60 dB
- minimum baseline = 20 m
- 1' resolution using 70% of the array @ 1.4 GHz

### OH: OK

Poussière @ 15 GHz?  $S(\nu) \sim \nu^{2.8} \times \text{size}$

détection du "pixel" central en:

- 3 m pour Hale-Bopp
- 22 h pour une comète brillante!

## programme de travail

### 1) la coma

- *Simuler les images radio de la coma (modèles d'expansion, excitation)*
- *Déterminer les paramètres (distance, activité) permettant une observation SKA (OH-18cm)*
- *Nombre de comètes observables par SKA (simultanément)*
- *Les raies moléculaires ( $H_2O$ ,  $NH_3$ ,  $H_2CO$ ,  $CH_3OH$ ...)*

### 2) émission thermique du noyau :

- *0.01" (SKA) = 7 km (noyau typique) @ 1UA (distance typique) => lignes de base longues*
- *hautes fréquences dans la bande de SKA*

*Intérêt : seulement une douzaine de noyaux ont révélé leur période de rotation*

*Rappel : le noyau est masqué par la poussière dans le visible*