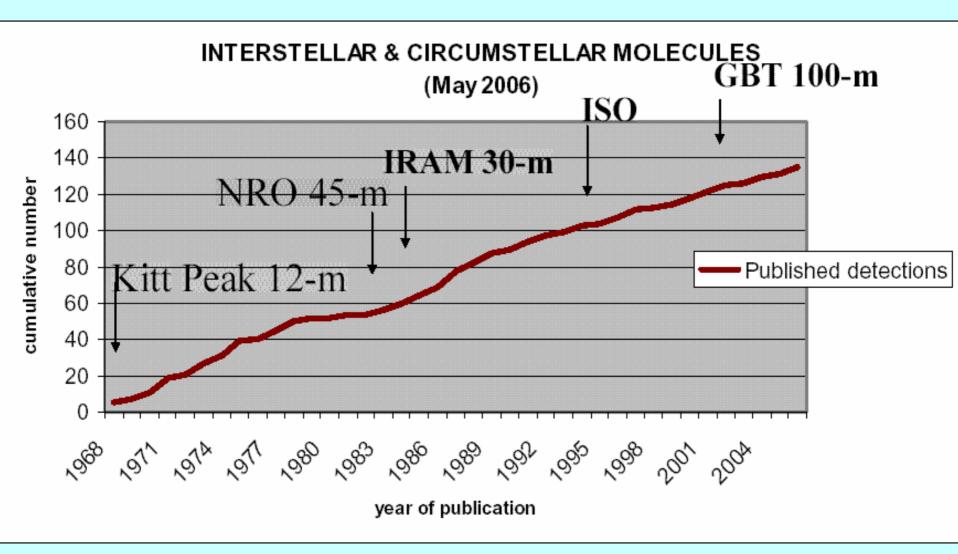
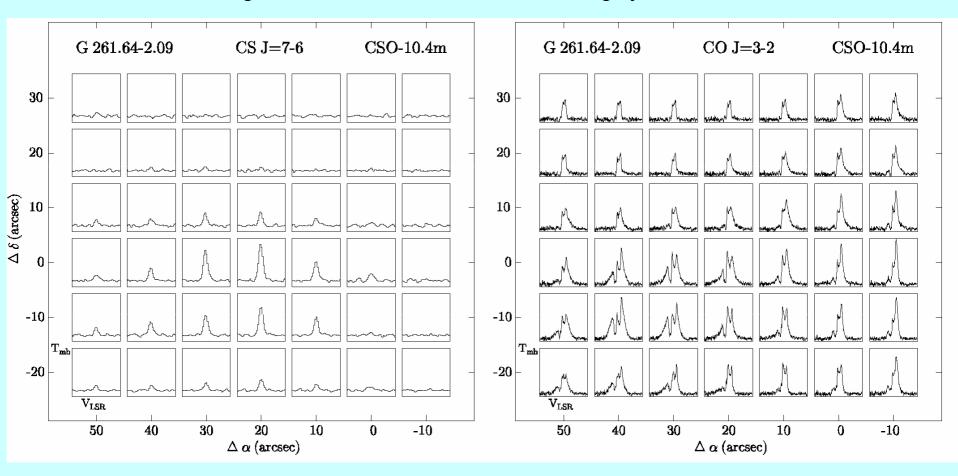


```
The 143 reported interstellar and circumstellar molecules
                                                        http://www.cv.nrao.edu/~awootten/allmols.html
                                                                         Molecules with Two Atoms
H<sub>2</sub> AIF AICI C<sub>2</sub> CH CH<sup>+</sup> CN CO CO<sup>+</sup> CF<sup>+</sup> CP CS HCl KCl N<sub>2</sub> NH NO NS NaCl OH PN SO
                                                        SO+ SiC SiH SiN SiO SiS HF SH FeO
                                                                        Molecules with Three Atoms
C<sub>3</sub> C<sub>2</sub>H C<sub>2</sub>O C<sub>2</sub>S CH<sub>2</sub> HCN HCO HCO<sup>+</sup> HCS<sup>+</sup> HOC<sup>+</sup> H<sub>2</sub>O H<sub>2</sub>S HNC HNO MgCN MgNC
N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> N<sub>2</sub>O NaCN OCS SO<sub>2</sub> c-SiC<sub>2</sub> CO<sub>2</sub> NH<sub>2</sub> H<sub>3</sub><sup>+</sup> SiCN AINC SiNC
                                                                         Molecules with Four Atoms
c-C<sub>3</sub>H I-C<sub>3</sub>H C<sub>3</sub>N C<sub>3</sub>O C<sub>3</sub>S C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> CH<sub>3</sub> CH<sub>2</sub>D<sup>+</sup>? HCCN HCNH<sup>+</sup> HNCO HNCS HOCO<sup>+</sup> H<sub>2</sub>CO
H<sub>2</sub>CN H<sub>2</sub>CS H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> NH<sub>3</sub> c-SiC<sub>3</sub> C<sub>4</sub> Molecules with Five Atoms
C<sub>5</sub> C<sub>4</sub>H I-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub> e-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub> CH<sub>2</sub>CN CH<sub>4</sub> HC<sub>3</sub>N HC<sub>2</sub>NC CH<sub>2</sub>NH HCOOH H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O H<sub>2</sub>NCN HNC<sub>3</sub> SiH<sub>4</sub>
SiC<sub>4</sub> H<sub>2</sub>COH<sup>+</sup>
                                                                         Molecules with Six Atoms
C<sub>5</sub>H C<sub>5</sub>O C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> CH<sub>3</sub>CN CH<sub>3</sub>NC CH<sub>3</sub>OH CH<sub>3</sub>SH HC<sub>3</sub>NH<sup>+</sup> HC<sub>2</sub>CHO HCONH<sub>2</sub> I-H<sub>2</sub>C<sub>4</sub> HC<sub>4</sub>H
HC<sub>4</sub>N C<sub>5</sub>N C<sub>5</sub>S
                                                                         Molecules with Seven Atoms
C<sub>6</sub>H CH<sub>2</sub>CHCN CH<sub>3</sub>C<sub>2</sub>H HC<sub>5</sub>N HCOCH<sub>3</sub> CH<sub>3</sub>NH<sub>2</sub> c-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O CH<sub>2</sub>CHOH
                                                                        Molecules with Eight Atoms
CH<sub>3</sub>C<sub>3</sub>N CH<sub>3</sub>OCHO CH<sub>3</sub>COOH C<sub>7</sub>H HC<sub>6</sub>H H<sub>2</sub>C<sub>6</sub> CH<sub>2</sub>OHCHO CH<sub>2</sub>CHCHO
                                                                         Molecules with Nine Atoms
CH<sub>3</sub>C<sub>4</sub>H CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>CN CH<sub>3</sub>CONH<sub>2</sub> CH<sub>3</sub>OCH<sub>3</sub> CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH HC<sub>7</sub>N C<sub>8</sub>H
                                                                          Molecules with Ten Atoms
CH<sub>3</sub>C<sub>5</sub>N? (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CO NH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>COOH? CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>CHO HOCH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>OH
                                                                       Molecules with Eleven Atoms
HC<sub>0</sub>N
                                                                       Molecules with Twelve Atoms
CH<sub>3</sub>OC<sub>2</sub>H<sub>5</sub> (CH<sub>2</sub>OH)<sub>2</sub>CO C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>
                                                                     Molecules with Thirteen Atoms
HC_{11}N
```

Общее количество идентифицированных молекул (начало работы новых инструментов)



Lapinov et al. 1998 Astron. & Astrophys. 336, 1007



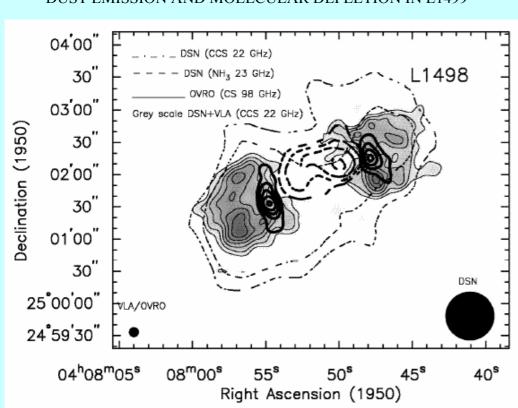
Одновременные карты G261.64-2.09 на 0.8мм с одинаковой диаграммой

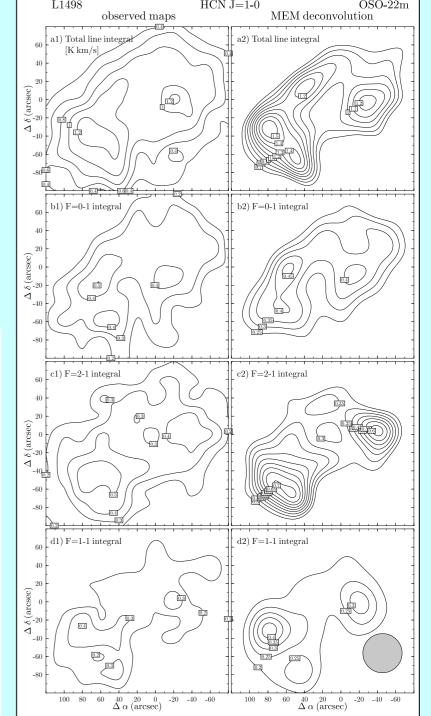
Линия	ν (МГц)	$\mu_0(D)$	$\tau(=A^{-1})$	n^* (cm ⁻³)	$E_{up}(K)$
CS(7-6)	342882.85484(82)	1.958(5)	20.0мин	1.1×10^7	65.8
CO(3-2)	345795.98985(16)	0.10980(3)	4.7дней	$3.1x10^4$	33.2

МЕМ восстановленное излучение HCN в L1498 на основе измерений в OSO-20m (правая панель)

Willacy K., Langer W.D., And Velusamy T. 1998 ApJ 507, L171

DUST EMISSION AND MOLECULAR DEPLETION IN L1499





Общая классификация молекулярных облаков

1. Горячие облака и молекулярные комплексы:

$$M_{gas} \sim 10^3 - 10^5 M_{sun}$$

 $T_k \sim 30 - 300 K$
 $\Delta V \sim 3 - 30 \text{ km/c}$

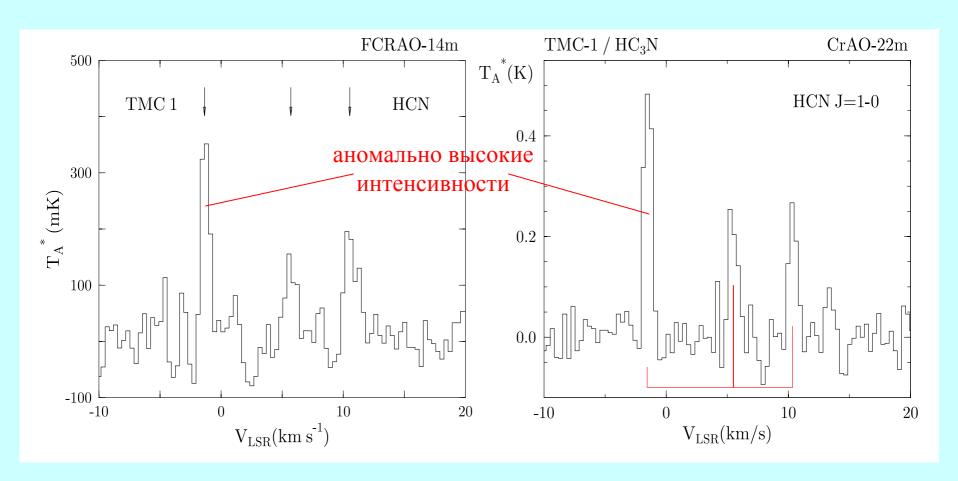
требуемое спектральное разрешение ($1M\Gamma_{\rm II} = \lambda_{\rm mm} \ {\rm km/c})$ $\nu = 300\Gamma\Gamma_{\rm II}, \ \Delta\nu_{\rm ch} = 1M\Gamma_{\rm II} \leftrightarrow 1{\rm km/c}$

2. Темные облака:

$$\begin{split} M_{gas} \sim 1-100 \; M_{sun} \\ T_k \sim 10 \; K \\ \Delta V \sim 0.1-1 \; \text{км/c} \\ \end{split}$$
 требуемое спектральное разрешение ($1 \text{к} \Gamma \text{ц} = \lambda_{\text{мм}} \; \text{м/c})$ $v = 100 \Gamma \Gamma \text{ц}, \; \Delta v_{ch} = 1 \text{к} \Gamma \text{ц} \; \leftrightarrow \; 3 \text{m/c} \end{split}$

Типичная точность рекомендуемых частот F.Lovas 2004 J.Pys.Chem.Ref.Data **33**, 177 составляет 30-100кГц!?

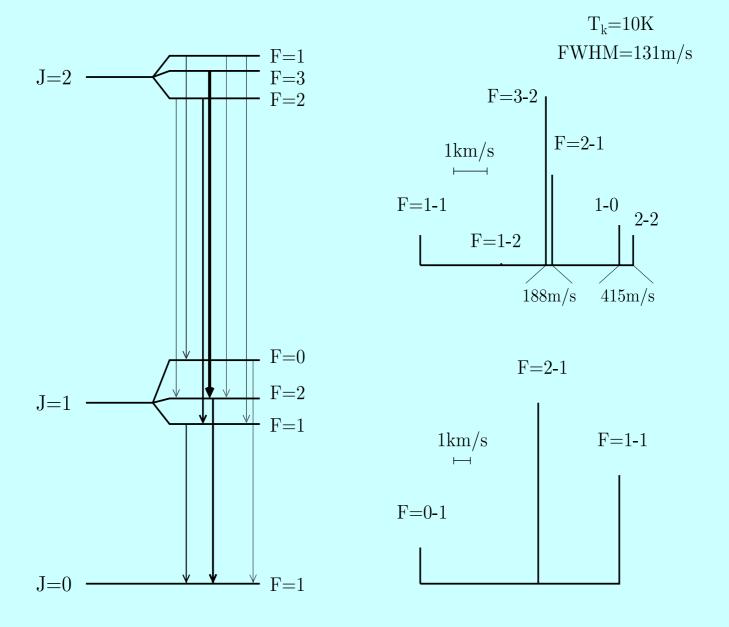
Излучение HCN в темных облаках



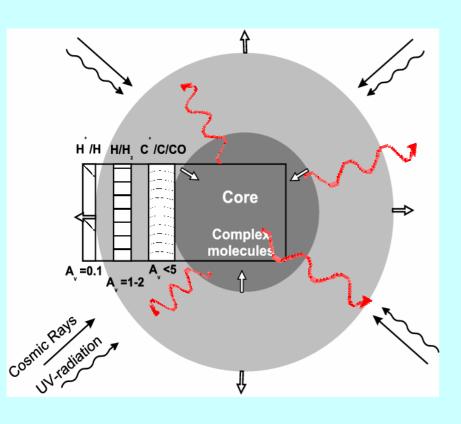
Irvine W.M., Schloerb F.P. 1984 ApJ 282, 516

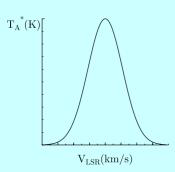
Наблюдения 1994г. на РТ-22 КрАО с мазером: Tsys=60K, спектр. разр. 100 кГц

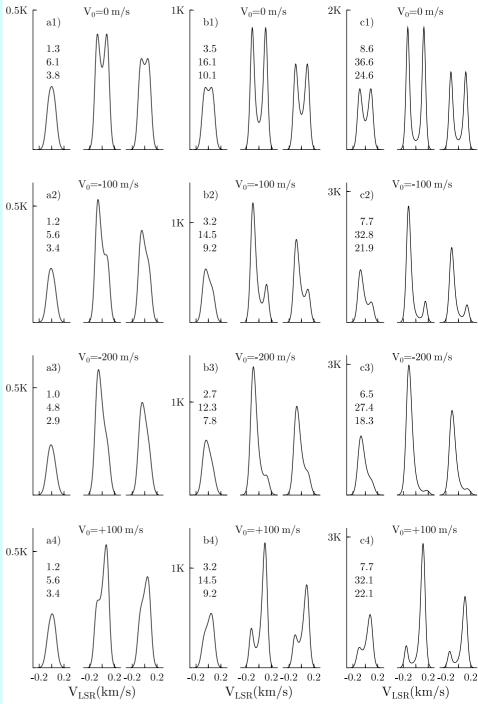
Сверхтонкая структура НСМ



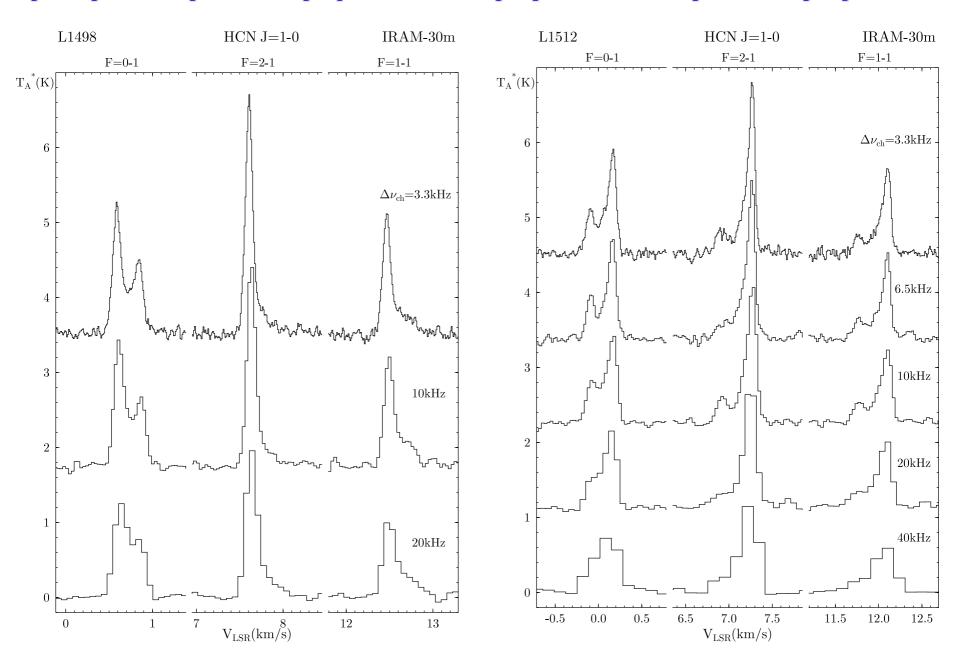
Лапинов А.В. 1989 Астрон.ж. 66, 264 Расчет излучения HCN в темных облаках



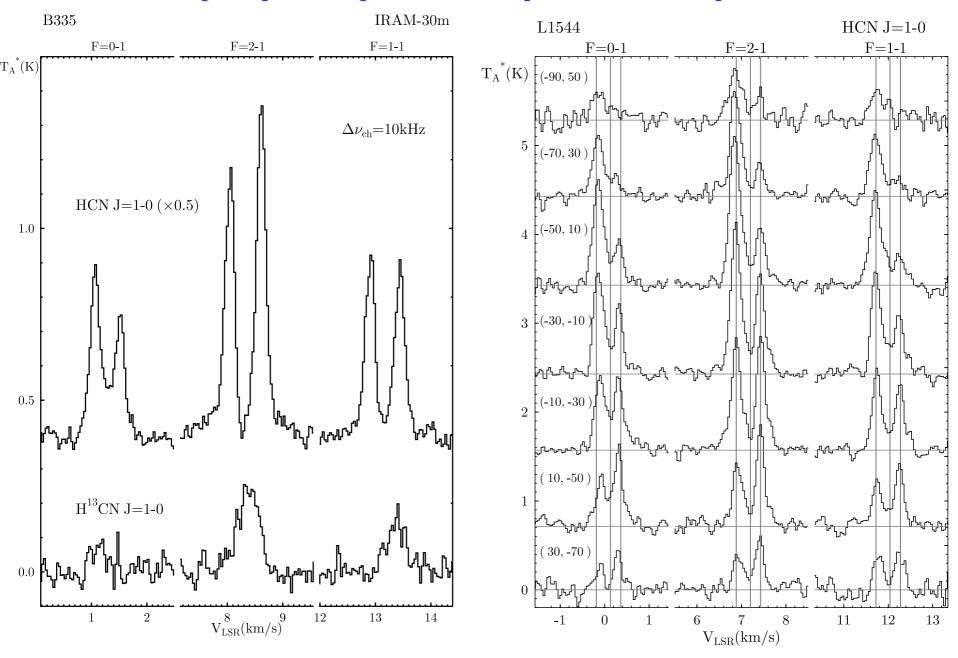


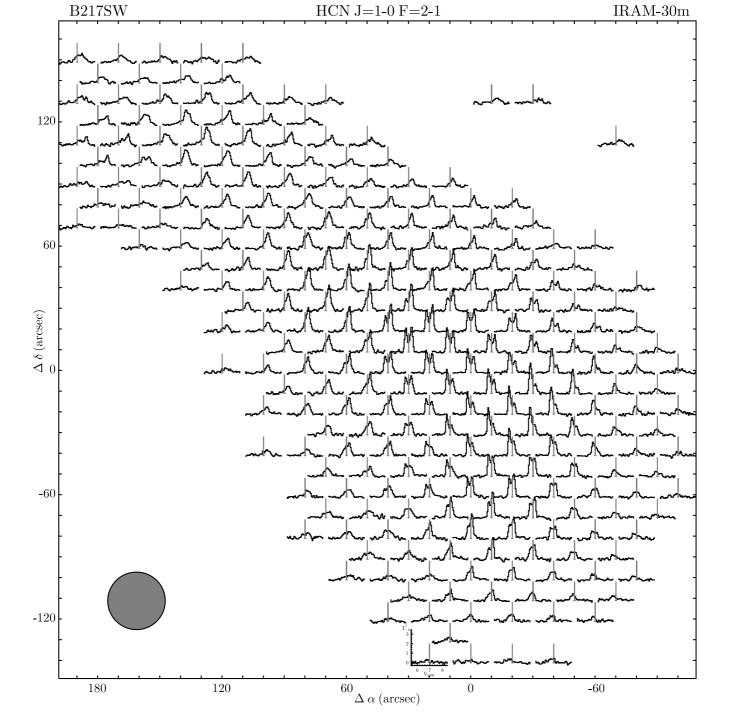


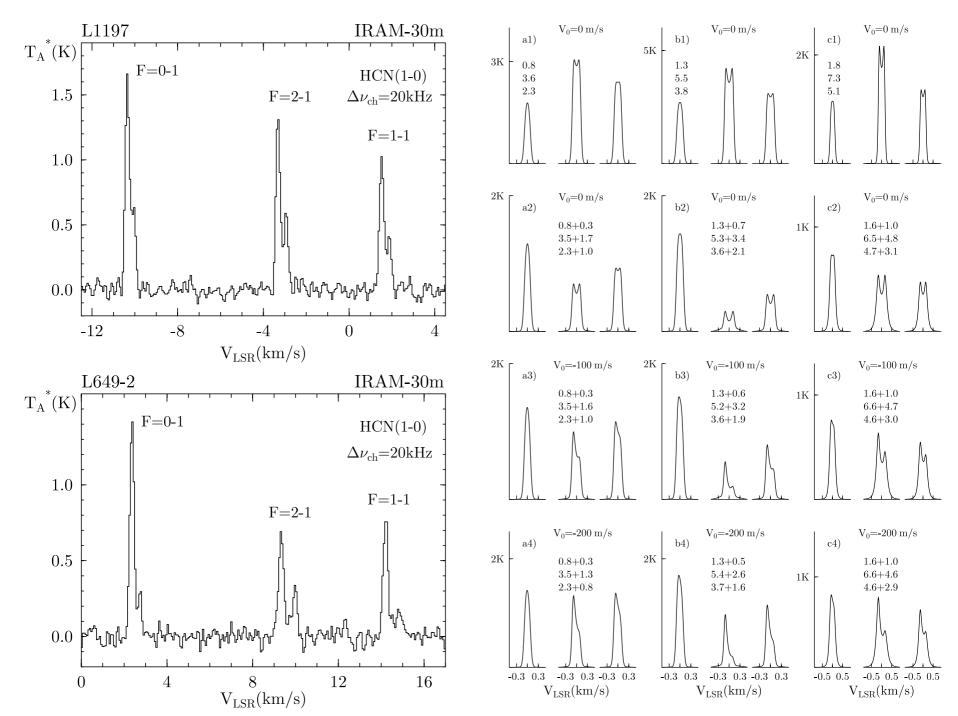
Примеры измеренных профилей HCN при разном спектральном разрешении



Примеры измерений НСN с разной асимметрией линий







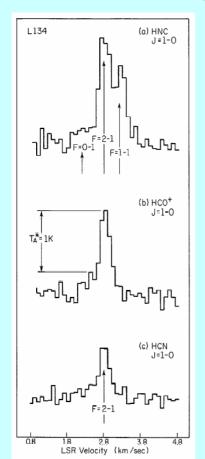
Радиоастрономическая спектроскопия HN¹³C J=1-0

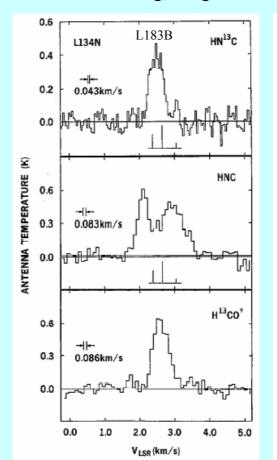
е
$$Qq_N(HCN)$$
= -4.70783(6)МГц, е $Qq_N(HNC)$ = -0.4 / +0.28(3)МГц ? C_N =10.13(2)кГц, C_N =?
$$\Delta E^{hf} = -eQq_N Y(F,J,I) + (C_N/2)[F,J,I]$$

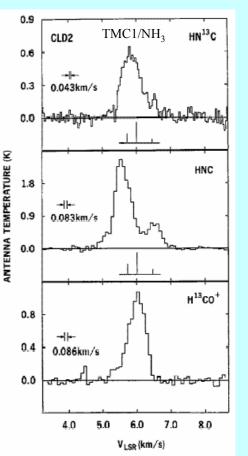
Для $E(HNC) - E(HCN) = 3920 \text{ cm}^{-1}$ в равновесии при Tk = 293K $X(HNC)/X(HCN) = 4x10^{-9}$

Snyder, Hollis and Buhl 1977 ApJ 215, L87

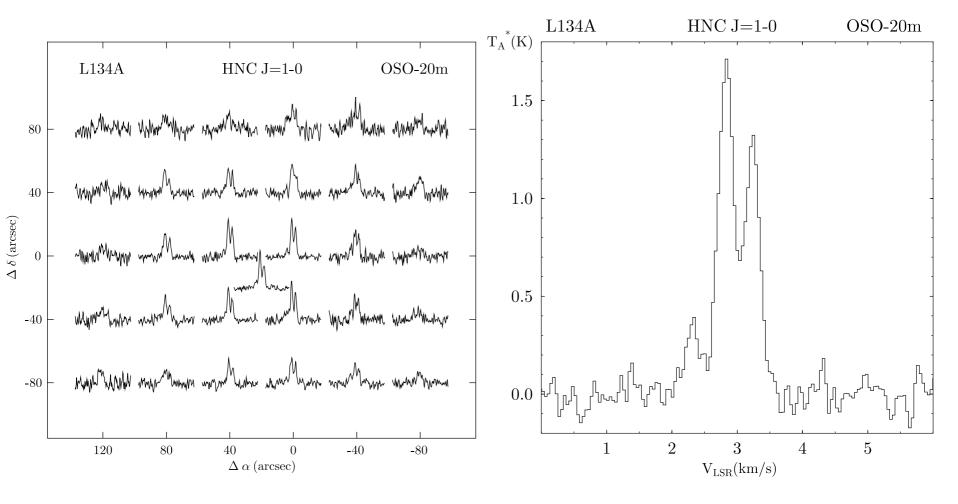
Frerking, Langer and Wilson 1979 ApJ 232, L65







Профили HNC в L134A (аномалии сверхтонкой структуры !?)



(Snyder L.E., Hollis J.M., and Buhl D. 1977 ApJ 215, L87: eQq(HNC)= -0.4MHz!?)



Location

Pico Veleta, Sierra Nevada, 45km from Granada, Spain, Long: 3°23'33.7"(W), Lat: 37°03'58.3"(N), Alt: 2920m

Receiver Parameters

Rx	Pol.	Rx combinations		tuning range (GHz)	T_rec (K)	IF (GHz)	IF-BW (GHz)	g_im (dB)		
A100	V			Q		80-115.5	60-80	1.5	0.5	>20
B100	Н	2			Q :	81-115.5	60-85	1.5	0.5	>20
C150	V		e :		Q :	130-183	70-125	4	1	15-25
D150	Н		Q	•		130-183	80-125	4	1	08-17
A230	V					197-266	85-150	4	1	12-17
B230	Н				Q	197-266	95-160	4	1	12-17
C270	V		Q			241-281	125-250	4	1	10-20
D270	Н		e			241-281	150-250	4	1	09-13
HERA	Н					210-276	110-380	4	1	~10

HCN and HNC spectroscopy in dark clouds

A. V. Lapinov¹

¹Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

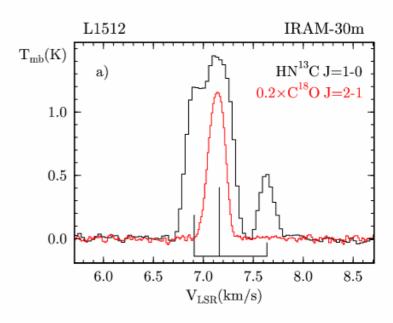


Figure 1: $\rm HN^{13}C(1-0)$ and $\rm C^{18}O(2-1)$ spectra in L1512 dark cloud. Frequency resolution is 10kHz.

Table 1: HN¹³C J=1–0 hyperfine structure

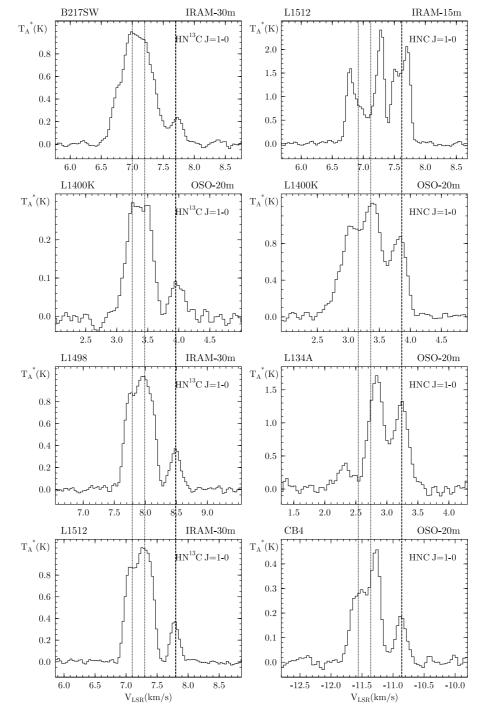
Component	Frequency (1	MHz)
	(Frerking et al.,1979)	(this work)
F=0-1	87090.735(46)	87090.6730(9)
F=2-1	87090.859(46)	87090.8112(8)
F=1-1	87090.942(46)	87090.8845(8)

References

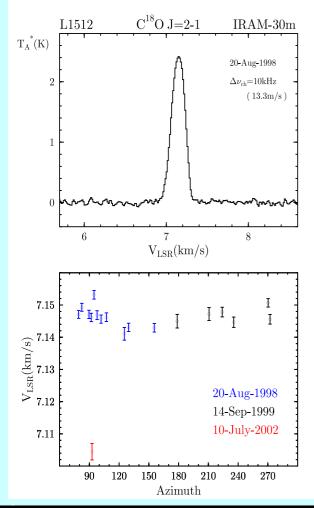
1) Frerking M.A., Langer W.D., Wilson R.W. 1979, ApJ 232, L65

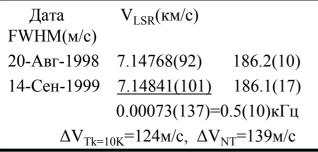
2) Lapinov, A. V. Abstracts of IAU Sumposium 197 "Astrochemistry: From Molecular Clouds to Planetary Systems", Sogwipo, South Korea, 1999b, 99

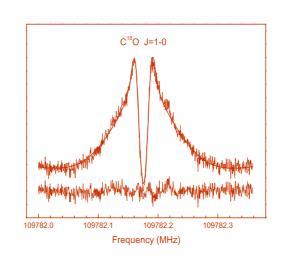
$$(eQq_N=275.7\pm1.4kHz, C_N=4.7\pm0.3kHz)$$

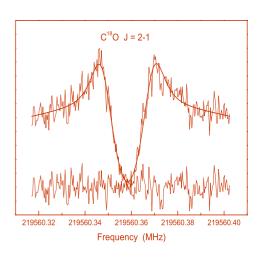


Прецизионная спектроскопия C18O J=1-0 и J=2-1









$C^{18}O J=1-0 : v_{cal}=109782.17580(15)MHz, \sigma_{V}=0.40 \text{m/c}$

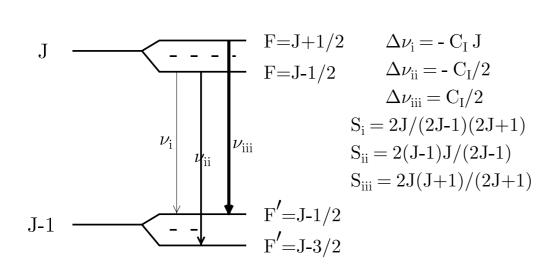
	cai	•
$ u_{obs}\left(\mathrm{M}\Gamma\mathrm{I}\mathrm{I}\right)$	О – С (кГц)	Ссылка
109782.160(20)	-15.8	Lovas F.J. 1992
109782.1734(63)	-2.40	Winnewisser et al. 1992
109782.17569(40)	-0.11	Cazzoli, Puzzarini & Lapinov 2003

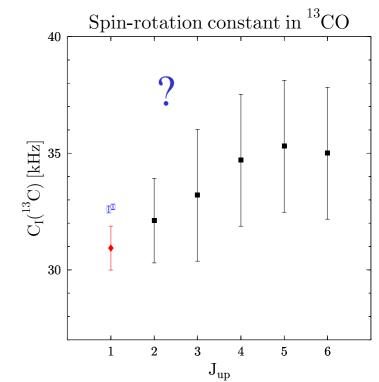
C¹⁸O J=2-1 : v_{cal} =219560.35782(26)MHz, σ_{V} =0.36m/c

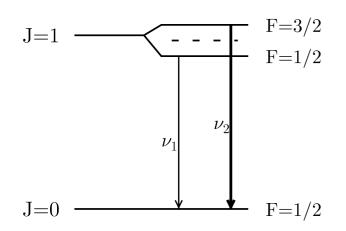
v _{obs} (МГц)	О – С (кГц)	Ссылка
219560.319(46)	-38.8	Lovas F.J. 1992
219560.3541(15)	-3.72	Klapper et al. 2001
219560.35824(46)	0.42	Cazzoli, Puzzarini & Lapinov 2003

Сверхтонкая структура 13СО

$$\Delta E^{hf}_{M} = (hC_{I}/2)[F(F+1) - J(J+1) - I(I+1)]$$





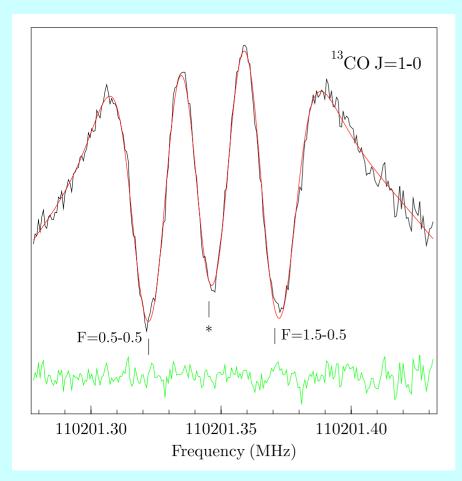


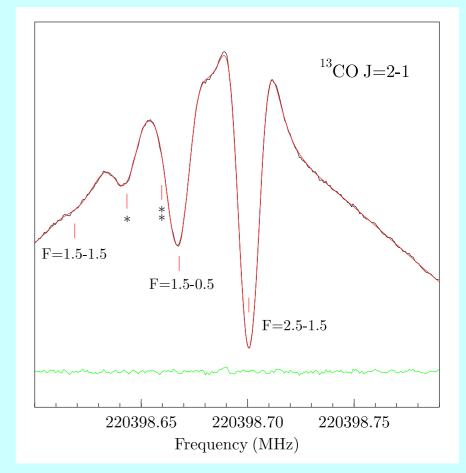
Важность учета сверхтонкого расщепления:

$$J=1-0$$
 1.5 $C_I=49$ к Γ ц ⇔ 133м/с $J=2-1$ 2.5 $C_I=82$ к Γ ц ⇔ 111м/с $\Delta V_{th}(Tk=10K)=126$ м/с

Примеры спектров ¹³CO с провалами Лэмба

Cazzoli, Puzzarini & Lapinov 2004 ApJ 611, 615

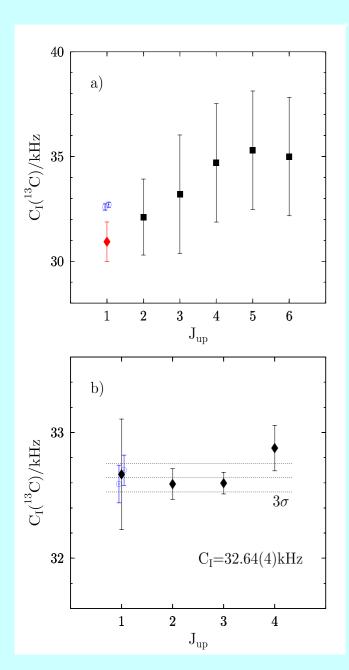




Усовершенствования при аппроксимации профилей:

- 1) Аналитически показано отсутствие столкновительного взаимодействия между компонентами в переходе ¹³CO J=1 0 (аналогично случаю целого спина у S.Green 1988 J.Chem.Phys. 88, 7331)
- 2) Модифицирована программа аппроксимации профилей поглощения при наличии кросс-резонансов (согласно подходу S.Mandal & P.N.Ghosh 1992 Phys.Rev.A 45, 4990)

Основные результаты спектроскопии ¹³СО



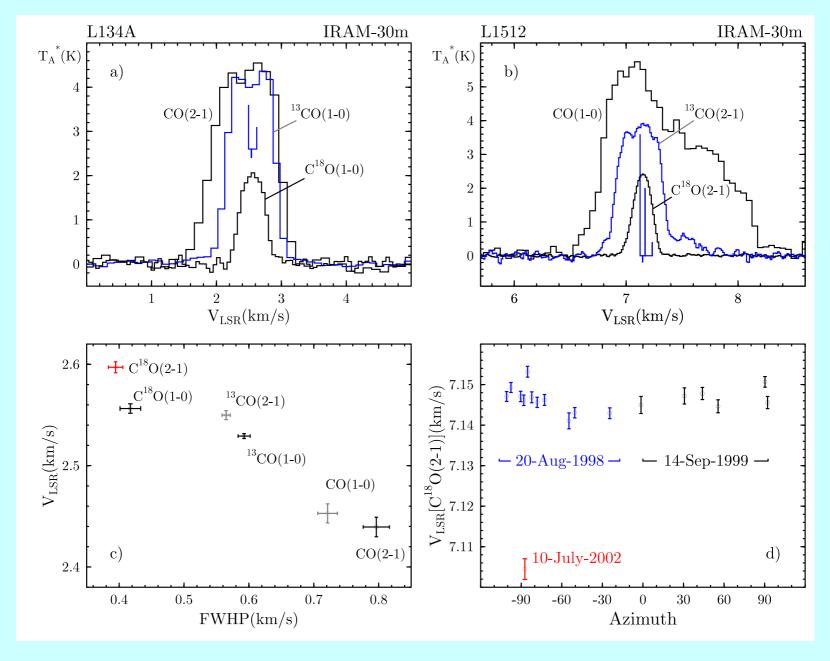
1) Получено превосходное согласие константы сверхтонкого расщепления с результатами для J=1 и независимость C_I от J

J_{up}	Молекулярны	ій пучек	Провал Лэмба
1	32.59(15)a	32.70(12)b 32.67(44)c
2			32.59(12) ^c
3			$32.60(09)^{c}$
4			32.88(18) ^c

- ^a Ozier, Lawrence & Ramsey 1968: MBMR
- ^b Meerts, de Leeuw & Dymanus 1977: MBER
- ^c Cazzoli, Puzzarini & Lapinov 2004: Lamb-dip

2) Получена точность предсказания вращательного спектра 13 CO $\leq 1 \ \kappa \Gamma \mu \ (1\sigma)$ во всем диапазоне $< 1 \ T \Gamma \mu \ (\sigma_V \leq 1 \ \text{м/c} \ \text{для } \nu < 1.5 \ T \Gamma \mu)$

J – J /	Частота (МГц)	σ_{v}/v	$\sigma_{V}(M/c)$
1–0	110201.354280(37)	3.4x10 ⁻¹⁰	0.10
2–1	220398.684129(66)	$3.0x10^{-10}$	0.09
3–2	330587.965223(90)	2.7x10 ⁻¹⁰	0.08
4–3	440765.17346(14)	3.2x10 ⁻¹⁰	0.09



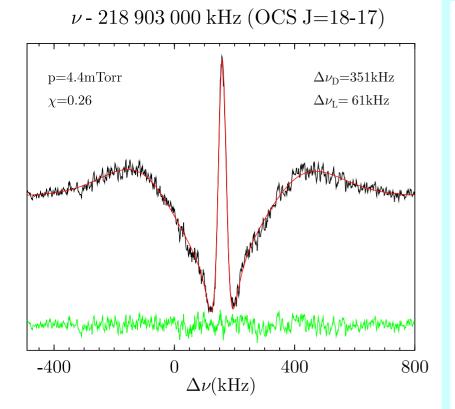
Профили линий изотопомеров СО в темных облаках без внутренних источников

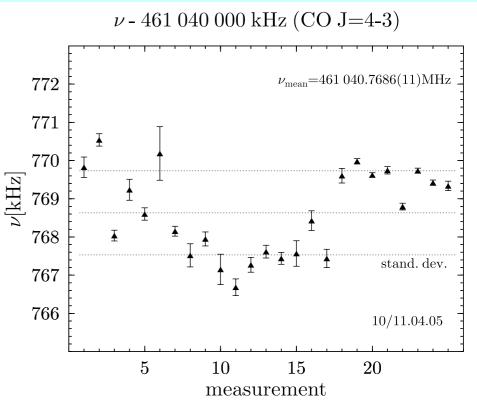
Прецизионная субдоплеровская спектроскопия ОСЅ

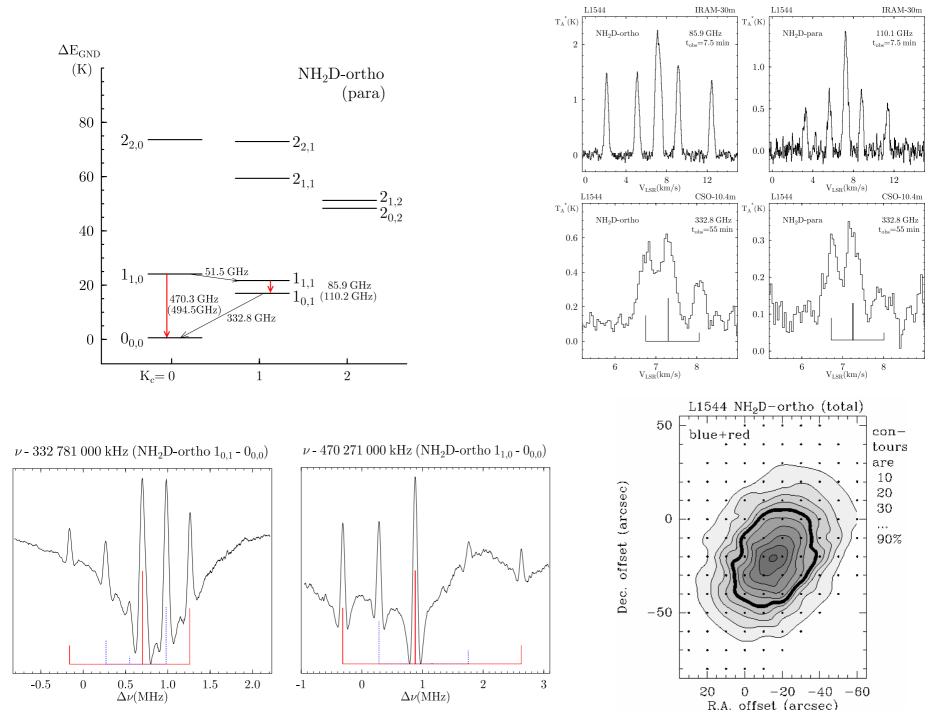
G.Yu.Golubiatnikov, A.V.Lapinov, A.Guarnieri, R. Knöchel, 2005 J.Molec.Spectrosc. 234, 190

Precise Lamb-dip measurements of millimeter and submillimeter wave rotational transitions of ¹⁶O¹²C ³⁴S

Все частоты $<500\Gamma\Gamma$ ц измерены с точностью $\le 1\kappa\Gamma$ ц, в диапазоне 0.89-1.1-c точностью РАД: $\sim \!\! 10\kappa\Gamma$ ц Основные результаты: Получена линейка частот с периодом $12\Gamma\Gamma$ ц. Достигнутая точность расчета: $0.1-0.4\kappa\Gamma$ ц для частот $<500\Gamma\Gamma$ ц $0.4-3.0\kappa\Gamma$ ц для частот $<1T\Gamma$ ц





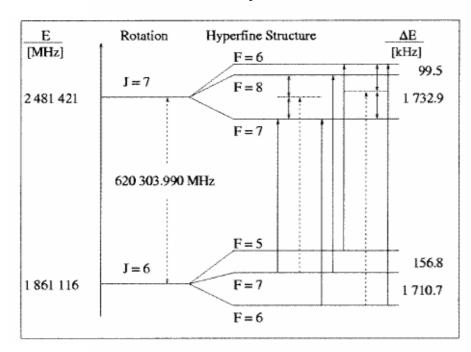


Анализ вращательного спектра НСМ

(о методических ошибках Ahrens et al. 2002 Z.Naturforsh. 57a, 669)

			This Work		
Constant	Ahrens et al. 2002	Thorwirth et al. 2003	Fit 1	Fit 2 (recommended)	
B ₀ (MHz)	44315.974970(156)	44315.97560(12)	44315.975546(60)	44315.975523(42)	
$D_0 (kHz)$	87.21635(169)	87.21680(73)	87.21668(100)	87.21622(64)	
$\mathrm{H}_{\mathrm{0}}\ (\mathrm{mHz})$	86.96(242)	85.85(95)	86.77(187)	86.03(143)	
eQq (kHz)	-4709.03(162)	-4709.6(15)	-4707.34(53)	$-4707.83(6)^a$	
eQq_J (Hz)	0.244(88)	0.212(61)	0.101(54)		
C_{N} (kHz)	10.09(38)	10.67(33)	10.20(13)	$10.13(2)^a$	
$\mathrm{C_{NJ}}$ (mHz)	-14.3(86)	-10.1(61)	-2.9(51)		
χ^2			0.626	0.692	

^a fixed parameter taken from Ebenstein & Muenter (1984) MBER experiment.



Выявленные ошибки:

- 1) Неполный набор частот-призраков,
- 2) Неправильное предположение об интенсивностях провалов Лэмба

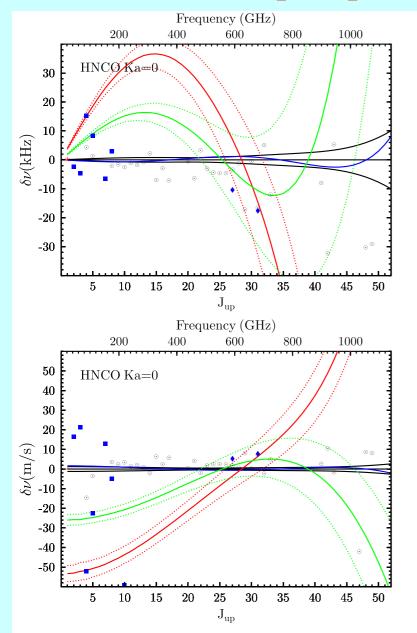
Основные полученные результаты:

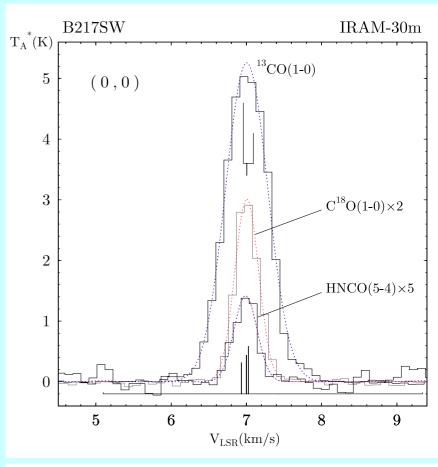
значительно повышены точности частот сверхтонких компонент; улучшено согласие с экспериментальными измерениями; не выявлена зависимость eQq и C_N от J.

Точность рассчитанных частот HCN J=1-0:

Переход	Частота(МГц)	$\sigma_{V}(M/c)$
F=1-1	88630.415094(85)	0.29
F=2-1	88631.847703(84)	0.28
F=0-1	88633.935837(96)	0.32

Лабораторная спектроскопия HNCO





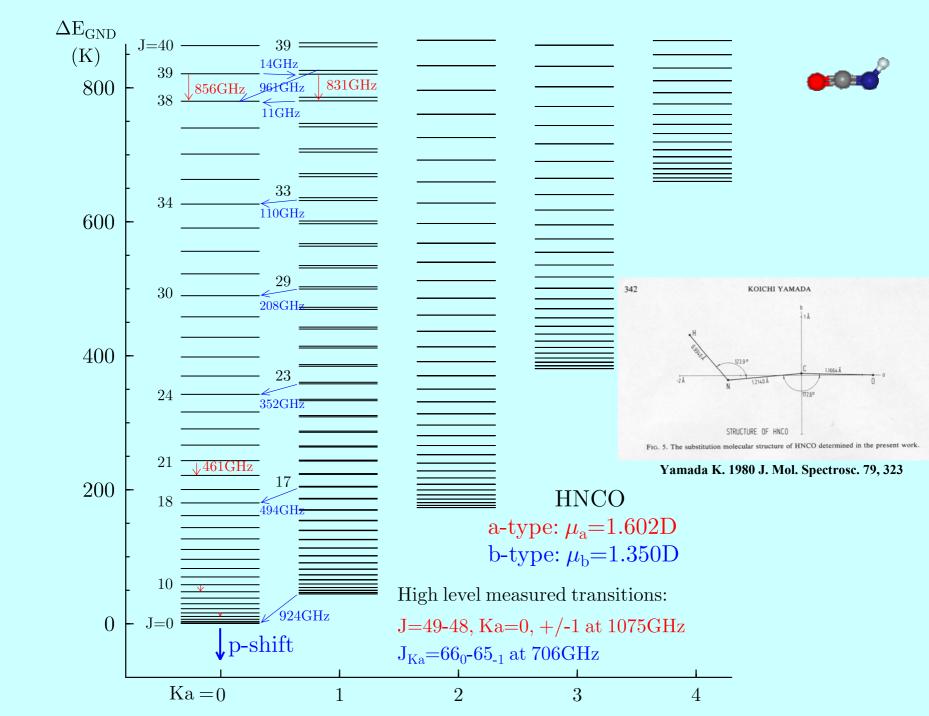
Линия VIsr(км/c) FWHM(м/c) TA(K)

¹³CO(1-0) 7.0054(16) 663(4)! 5.48(3)

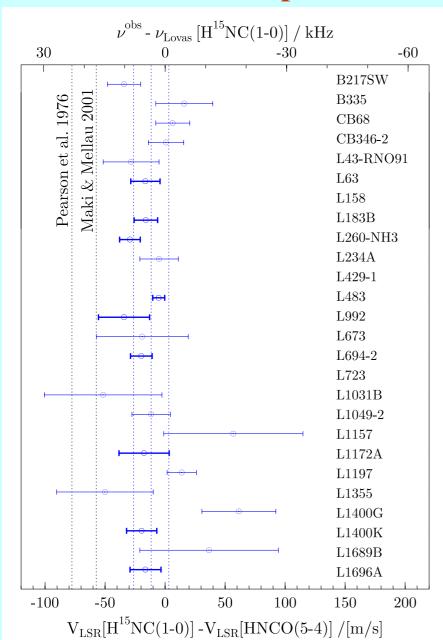
C¹⁸O(1-0) 7.0047(19) 354(5) 1.59(2)

HNCO(5-4) 6.9941(114) 332(33) 0.32(3)

при $X(^{13}CO)/X(C^{18}O)=500/90$ получим Tex=10.75K и $\tau[^{13}CO(1-0)]=1.33(4)$



Радиоастрономическая спектроскопия H¹⁵NC



Определение частоты H¹⁵NC J=1-0:

Лабораторные измерения:

88 865.692(26)МГц Lovas F.J., 2004

(Saykally et al. 1976, Ohio Symposium #31)

88 865.715(40)МГц Pearson et al. 1976

88 865.709(45)МГц Maki et al. 2001

Радиоастрономические оценки:

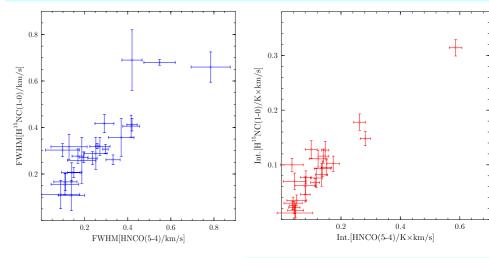
88 865.6954(44)МГц (23 темных облака)

88 865.6964(26)МГц (9 темных облаков)

H.Bechtel (MIT) измерения в струе:

88 865.6955(20) $M\Gamma\mu$ – 16.03.07 & 05.04.07

 $88\ 865.6967(9)$ МГц -05.04.07



Примеры использования прецизионной спектроскопии для исследования динамики областей звездообразования

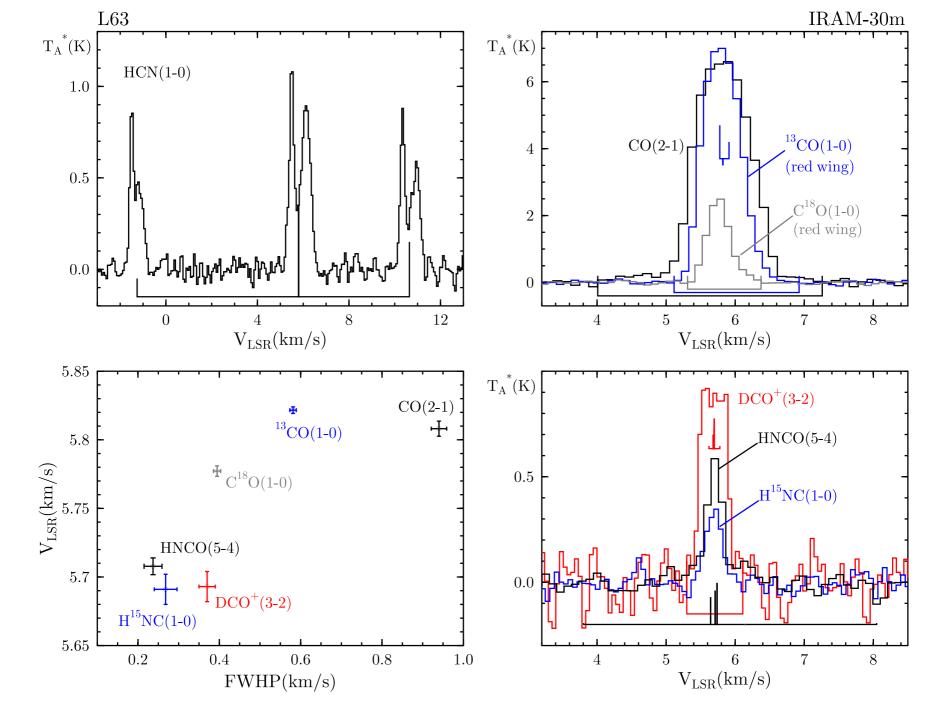
Параметры линий из обзора темных облаков (>50) на IRAM-30m

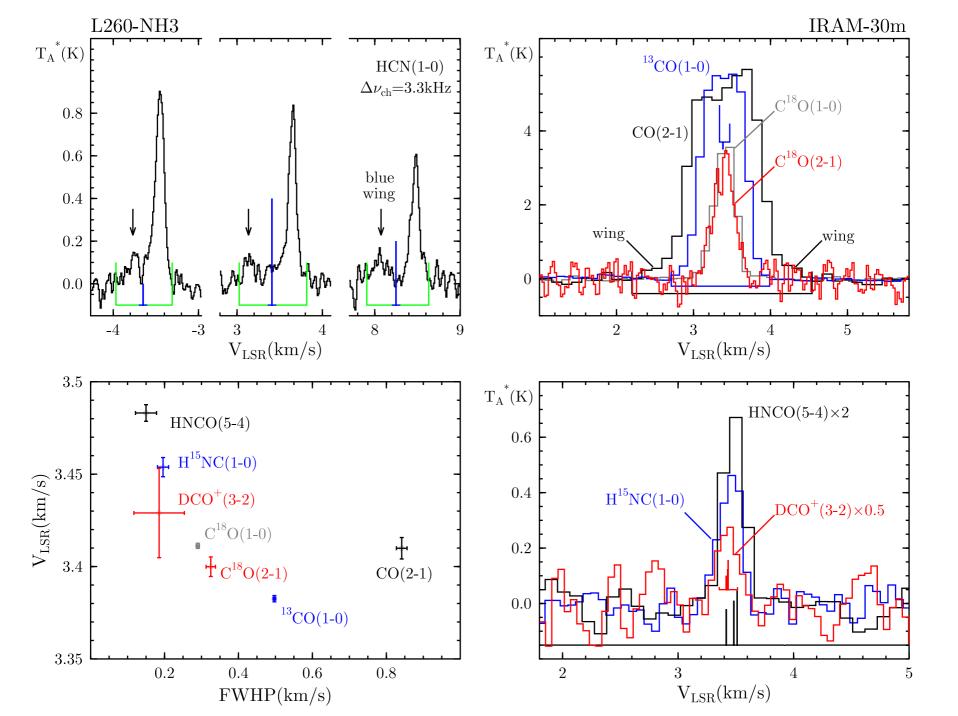
No.	Линия	Частота(МГц)	σ_{v}/v	$\sigma_{V}(M/c)$	$E_{up}(K)$	n* _{10К} (см- ³)
1. 2.	HCN(1-0) [†] H ¹⁵ NC(1-0) [†]	88 631.602182(82) 88 865.6954(44)	9.5x10 ⁻¹⁰ 5.0x10 ⁻⁸	0.28 15	4.3 4.3	$8.0x10^{5} \\ 8.4x10^{5}$
3. 4. 5.	$C^{18}O(1-0)$ $HNCO(5-4)^{\dagger}$ $^{13}CO(1-0)^{\dagger}$	109 782.17580(15) 109 905.74781(43) 110 201.354280(37)	1.4x10 ⁻⁹ 3.9x10 ⁻⁹ 3.4x10 ⁻¹⁰	0.40 1.2 0.10	5.3 15.8 5.3	$7.7x10^{2}$ $1.0x10^{5}$ $7.8x10^{2}$
6. 7.	DCO ⁺ (3-2) [†] CO(2-1)	216 112.5800(6) ^a 230 537.99996(11) ^b	2.8x10 ⁻⁹ 4.8x10 ⁻¹⁰	0.83 0.14	20.7 16.6	$8.3x10^{5}$ $5.4x10^{3}$
8. 9.	$C^{18}O(2-1)$ $^{13}CO(1-0)^{\dagger}$	219 560.35782(26) 220 398.684129(66)	1.2x10 ⁻⁹ 3.0x10 ⁻¹⁰	0.36 0.09	15.8 15.9	$4.7x10^3 4.8x10^3$

[†] центры линий без учета сверхтонкого расщепления

^a P.Casseli & L.Dore 2005 A&A 433, 1145

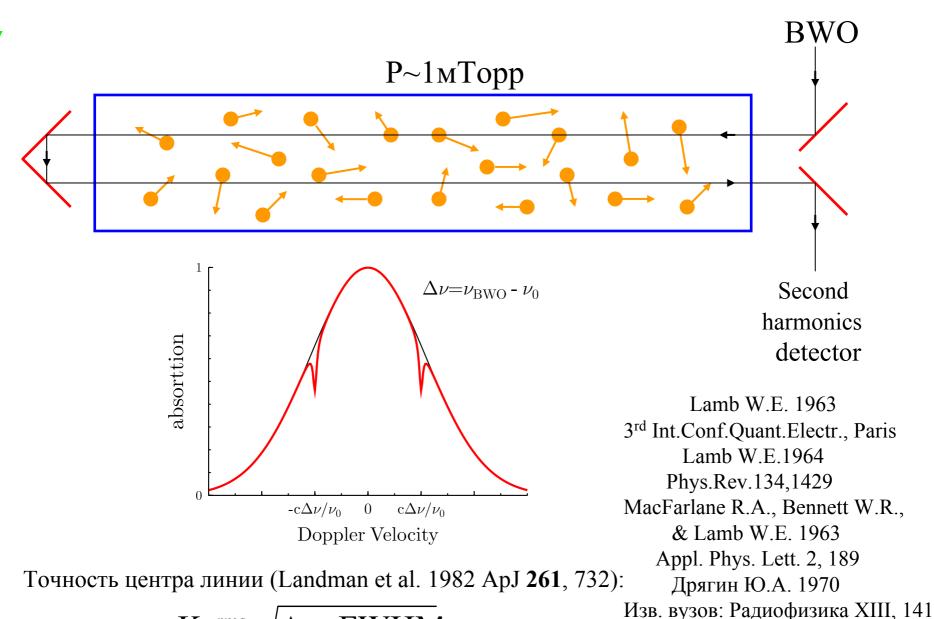
^b G.Winnewisser, S.P.Belov, Th.Klaus, R.Schieder 1997 J.Mol.Spectrosc. 184, 468





СПАСИБО ЗА ВИМАНИЕ!

Особенности спектроскопии с провалом Лэмба



 $\sigma_{v_0} = K \frac{rms}{\sigma(v_0)} \sqrt{\Delta v_{res} FWHM}$