

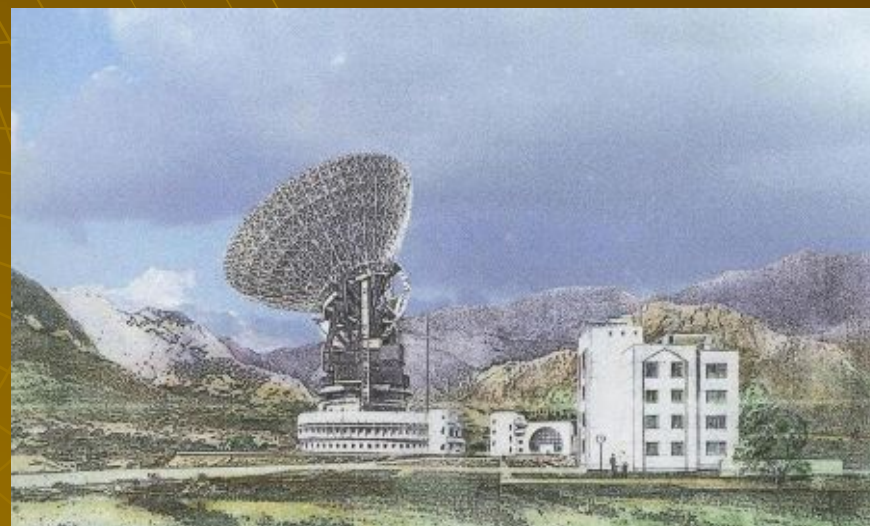


«Повышение эффективности и модернизация радиотелескопов России»
22 - 27 сентября 2006г., САО РАН, п. Нижний Архыз, КЧР



К вопросу создания приемного аппаратурного комплекса радиообсерватории РТ-70

*Артеменко Ю.Н., Барышев А.М., Вдовин В.Ф., Дубрович В.К.,
Кардашев Н.С., Зинченко И.И.*



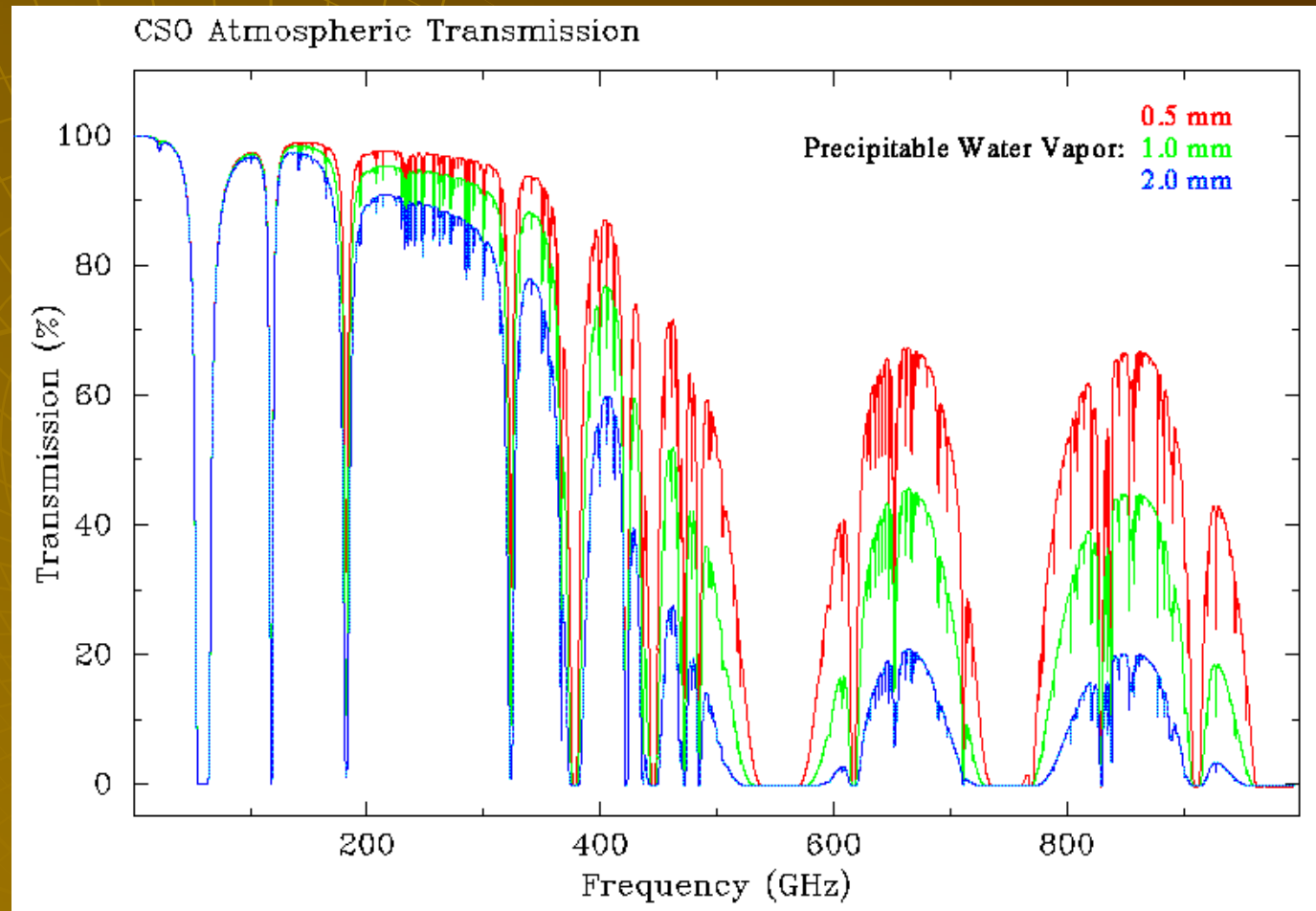
Содержание

- ◆ Требования к аппаратурному комплексу
- ◆ Примеры построения приемных систем на крупных миллиметровых антеннах
- ◆ Варианты построения приемного комплекса для РТ-70

Требования к аппаратурному комплексу

Научные задачи	Требования к системе
Наблюдения слабых точечных источников (потoki, мгновенные спектры, поляризация) мазеры линии при больших z	Предельно высокая чувствительность по потоку Возможность одновременных измерений на нескольких частотах в двух поляризациях Точность наведения лучше HPBW/5 Высокое спектральное разрешение Широкая полоса спектрального анализа
Исследования протяженных объектов в континууме и в линиях	Высокая чувствительность по яркости Низкий уровень боковых лепестков Матричные приемники большой размерности на 2 поляризации
Обзоры небесной сферы Спектрально-пространственные флуктуации CMBR	См. предыдущий пункт Многочастотные измерения Максимально широкая полоса спектрального анализа

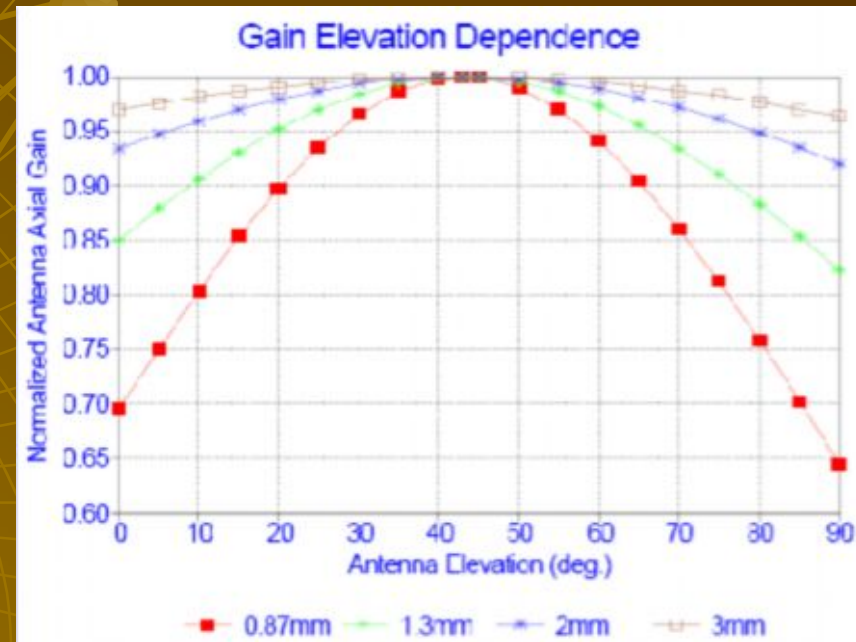
Зависимость атмосферной прозрачности от содержания водяного пара



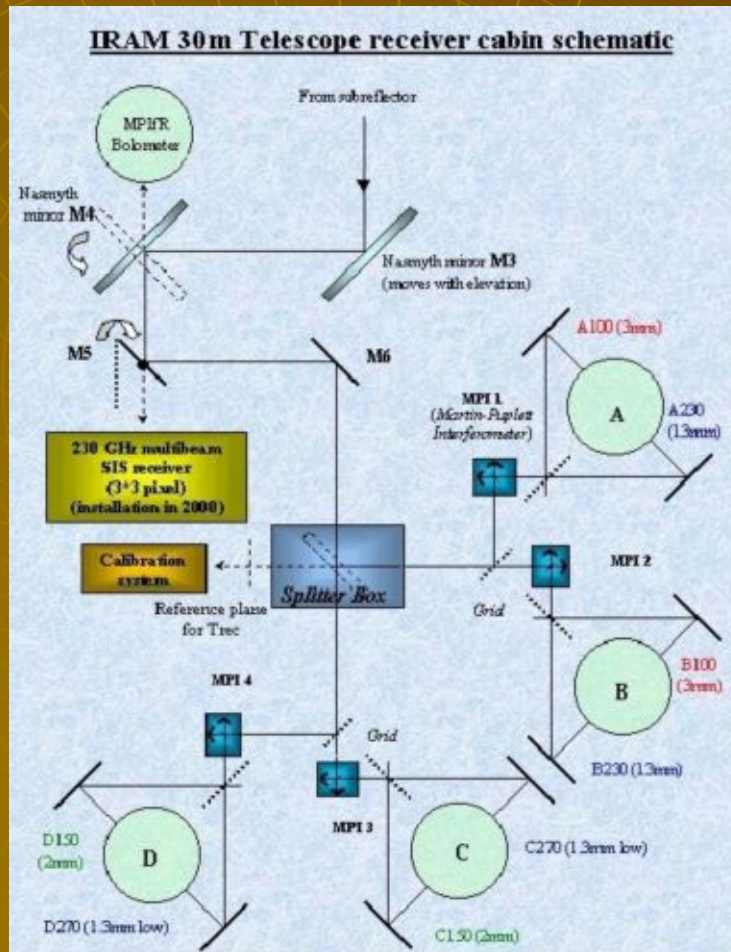
Приемные системы на крупных миллиметровых антеннах

- ◆ 30-м радиотелескоп Института миллиметровой радиоастрономии (IRAM)
- ◆ 45-м радиотелескоп Национальной радиоастрономической обсерватории (Япония)
- ◆ 50-м Большой миллиметровый радиотелескоп (LMT) в Мексике
- ◆ 64-м радиотелескоп на Сардинии (SRT, Италия)

30-m радиотелескоп IRAM



Комплекс приемной аппаратуры

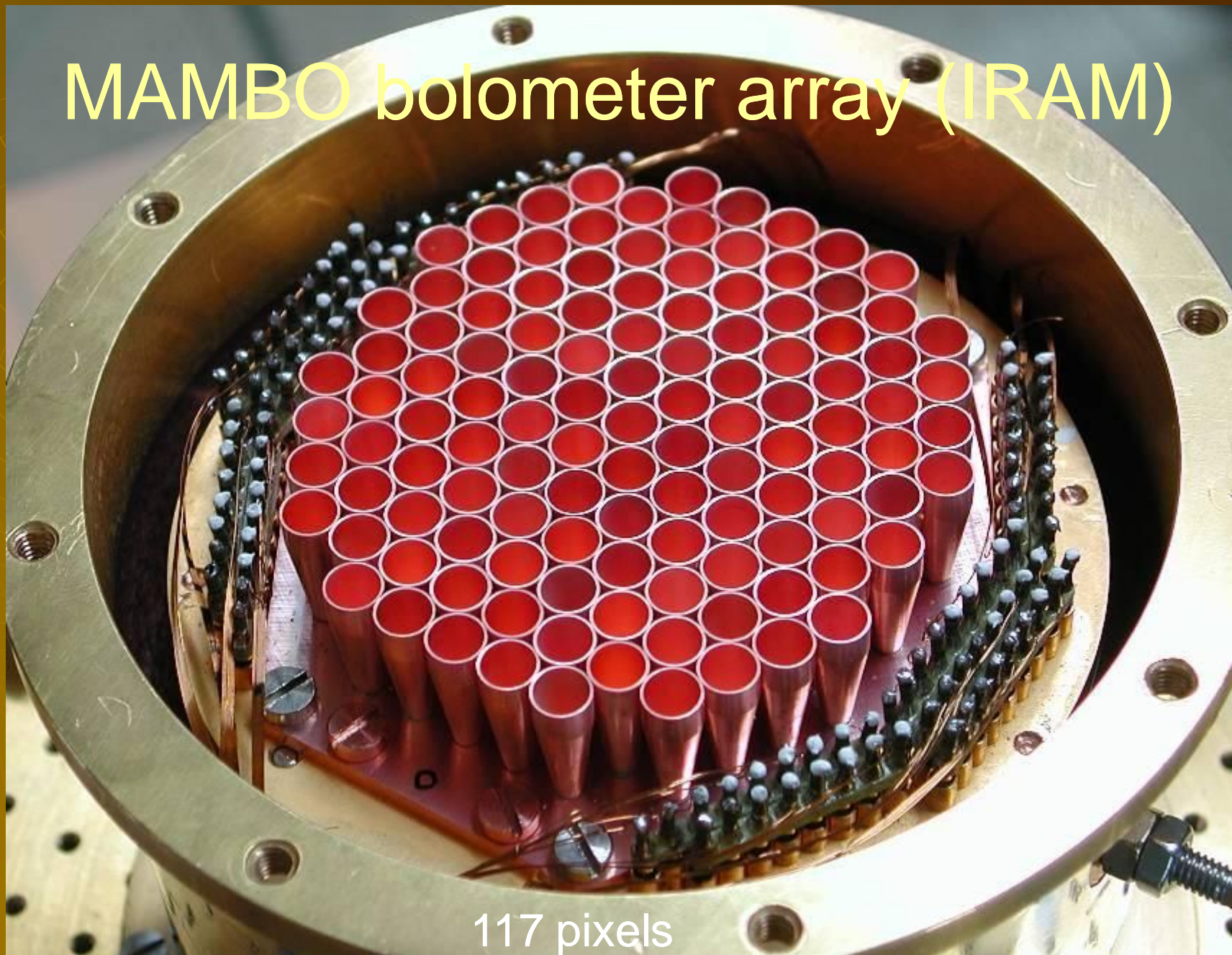


Комплекс приемной аппаратуры

- ◆ Комплекс приемной аппаратуры включает в себя следующее:
 - 4 пары (на две поляризации) однолучевых супергетеродинных СИС приемников, работающих на частотах от 72 ГГц до 280 ГГц;
 - многолучевой (2×9) СИС приемник HERA, работающий в диапазоне 215-272 ГГц;
 - матрицу болометров МАМВО-II диапазона длин волн 1.2 мм (117 элементов).
- ◆ Для спектрального анализа имеется набор фильтровых спектроанализаторов и автотрассировочный спектроанализатор VESPA.
- ◆ Приемники могут использоваться в различных комбинациях (до 4-х приемников одновременно).
- ◆ Все приемники размещены неподвижно в нэсмитовском фокусе антенны.

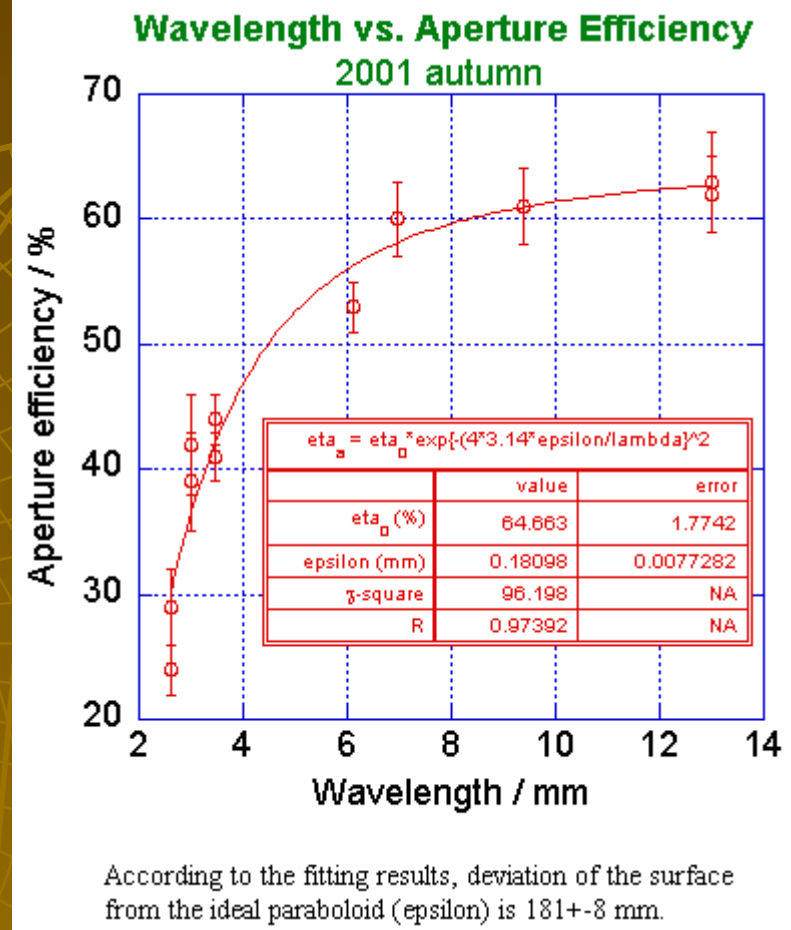
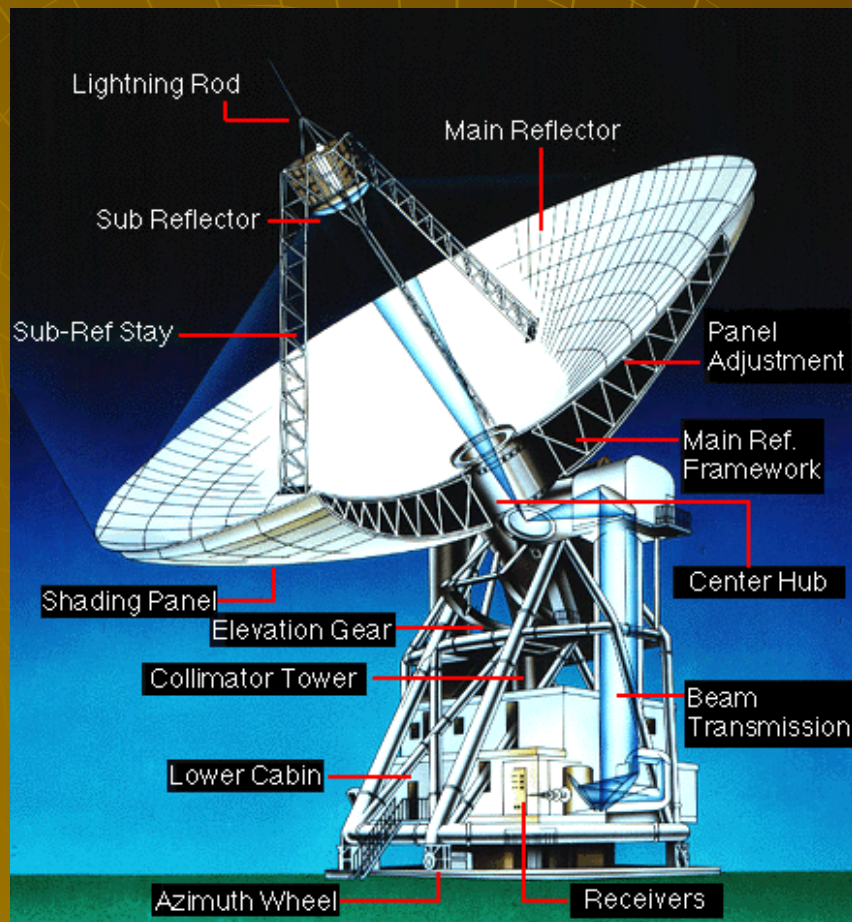
Rx	Pol.	Rx combinations				tuning range (GHz)	T_rec (K)	IF (GHz)	IF-BW (GHz)	g_im (dB)	Remarks
A100	V	●		●		80-115.5	60-80	1.5	0.5	>20	1
B100	H	●			●	81-115.5	60-85	1.5	0.5	>20	1
C150	V		●		●	130-183	70-125	4	1	15-25	
D150	H		●	●		130-183	80-125	4	1	08-17	
A230	V	●		●		197-266	85-150	4	1	12-17	
B230	H	●			●	197-266	95-160	4	1	12-17	
C270	V		●		●	241-281	125-250	4	1	10-20	2
D270	H		●	●		241-281	150-250	4	1	09-13	2
<u>HERA</u>	H V					215-272 215-241	110-380 120-340	4	1	~10	2, 3

MAMBO bolometer array (IRAM)



117 pixels

45-m радиотелескоп NRO (Япония)



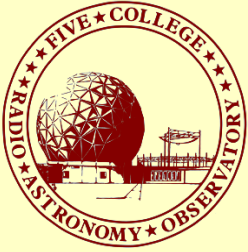
Комплекс приемной аппаратуры

Receiver	Freq. Range (GHz)	Bandwidth (MHz)	Tsys (K)	Remarks
H22	20.0 - 24.0	2000	100	HEMT
H28/30	26 - 30.2	2000	150	HEMT
H40	42 - 44	2000	250	HEMT
S40	35 - 50	600	150 - 300	SIS Mixer
S80	72 - 115	600	250 - 500	SIS Mixer
S100	77 - 115	600	300 - 500	SIS Mixer
BEARS	82 - 116	600	200 - 400	SIS 25-BEam Array
NOBA	150	30 GHz		Bolometer Array

50-м Большой миллиметровый радиотелескоп в Мексике

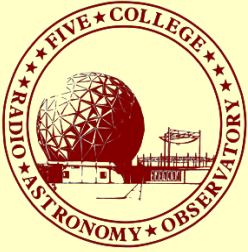


- ◆ Радиотелескоп расположен на высоте 4600 м.
- ◆ Ожидаемая точность поверхности – 75 мкм. Предусмотрена подстройка поверхности.
- ◆ Ожидаемая точность слежения $\sim 1''$.
- ◆ Радиотелескоп построен по схеме Кассегрена-Нэсмита. При помощи системы зеркал принимаемый сигнал направляется в приемную кабину, где будут стационарно располагаться приемники.



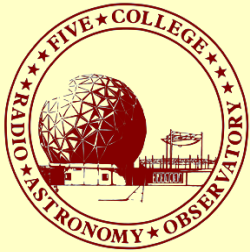
LMT's Initial Instruments

- SEQUOIA (λ 3mm)
 - 32 element heterodyne receiver array
 - **In use on UMass 14m Antenna**
- LMT Spectrometer (for use with heterodyne receivers)
 - 64-input Narrowband system in use on UMass 14m Antenna
 - 32-input Wideband system under development
- AzTEC (λ 2.1, λ 1.4, or λ 1.1mm)
 - 144-element continuum array
 - **Observing Runs on James Clerk Maxwell Telescope (JCMT) in 2005-2006.**

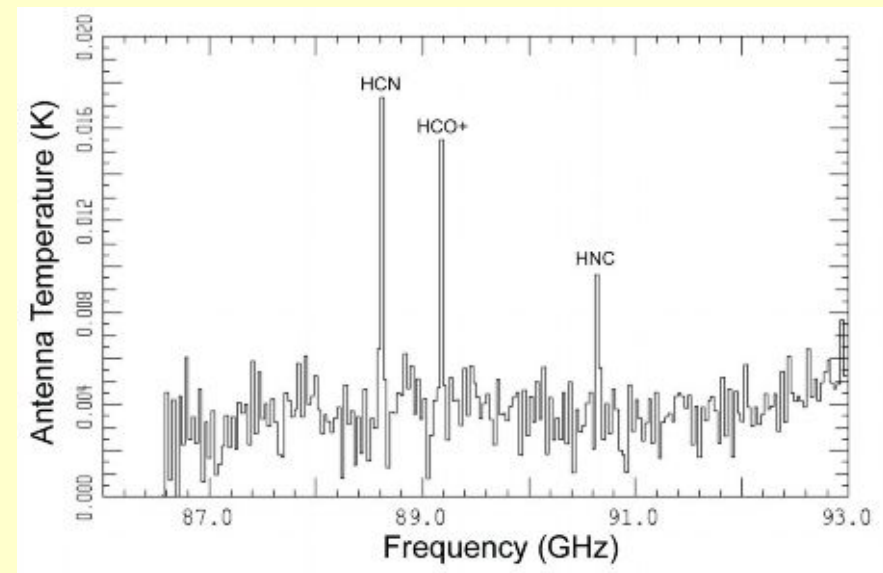
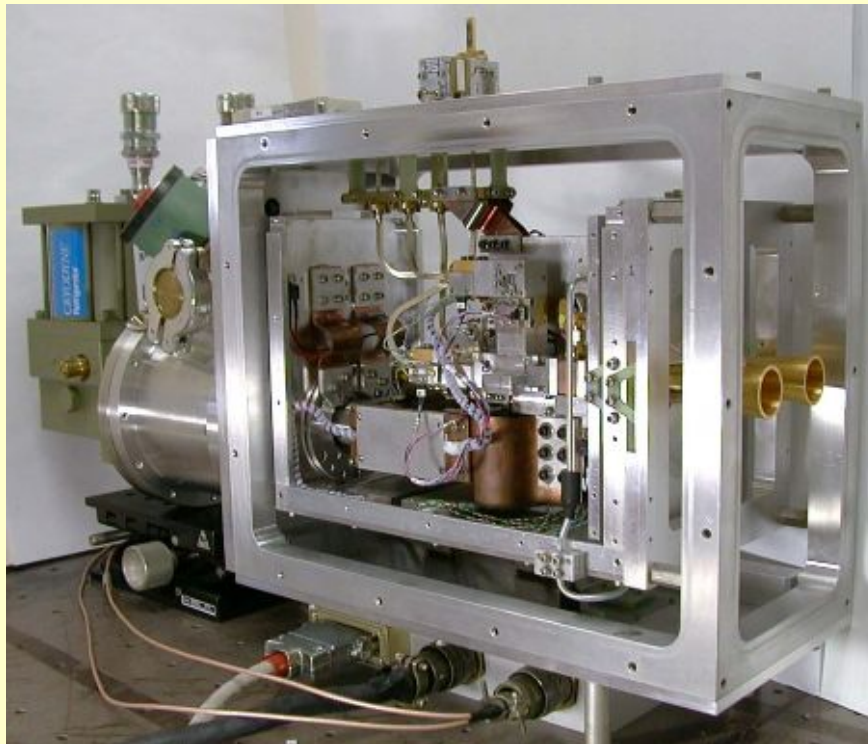


LMT's Initial Instruments

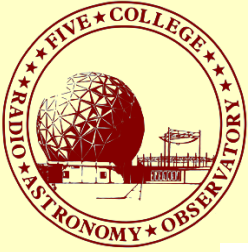
- Redshift Receiver (λ 3mm)
 - Ultrawide band receiver for redshift searches
 - Completion in 2006; testing at FCRAO 14m; seeking interim observing opportunities.
- SPEED (λ 2.1, λ 1.4, λ 1.1, and λ 0.85mm)
 - Multi-wavelength continuum system using Frequency Selective Bolometers
 - Completion expected in 2007; Engineering run on HHT to be scheduled.
- Dual Polarization Receiver (λ 1mm)
 - general purpose receiver for spectroscopy and redshift searches



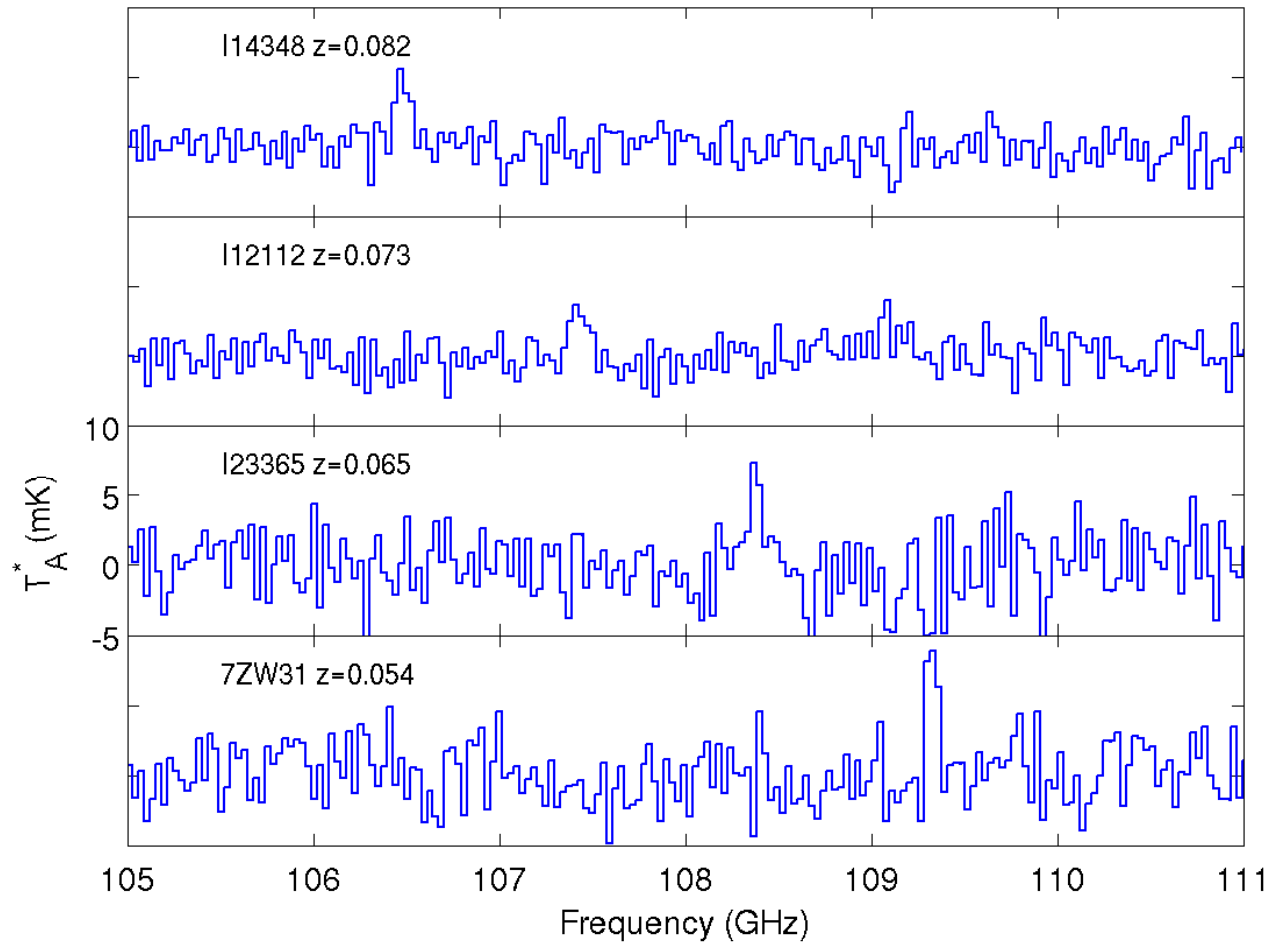
Redshift Receiver

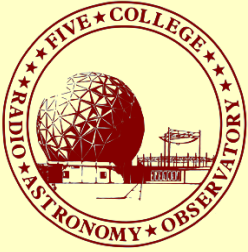


Test Observation of IC342

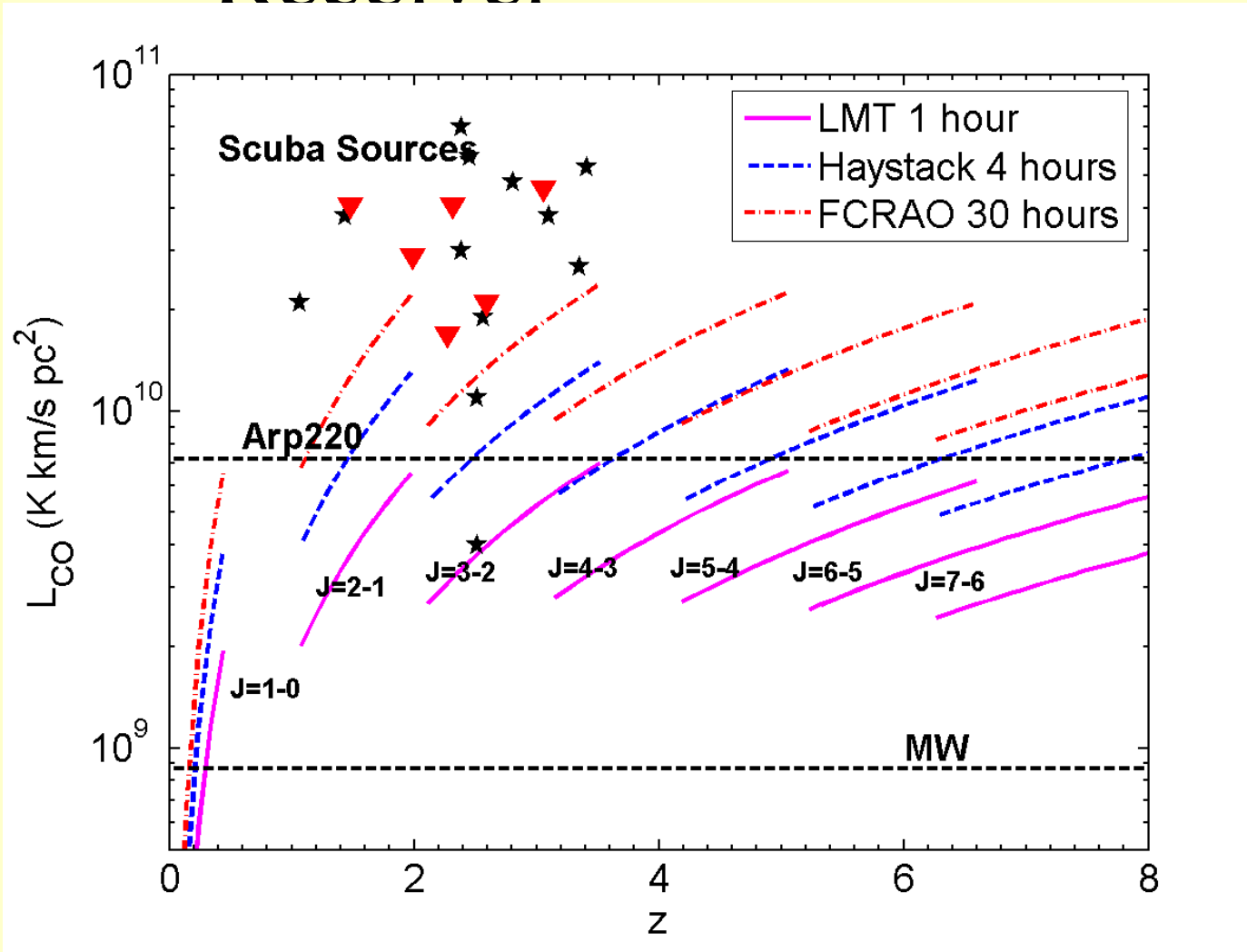


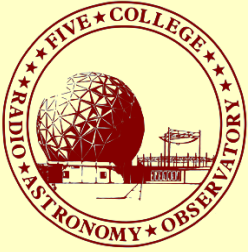
Redshift Receiver Results from FCRAO 14m Telescope



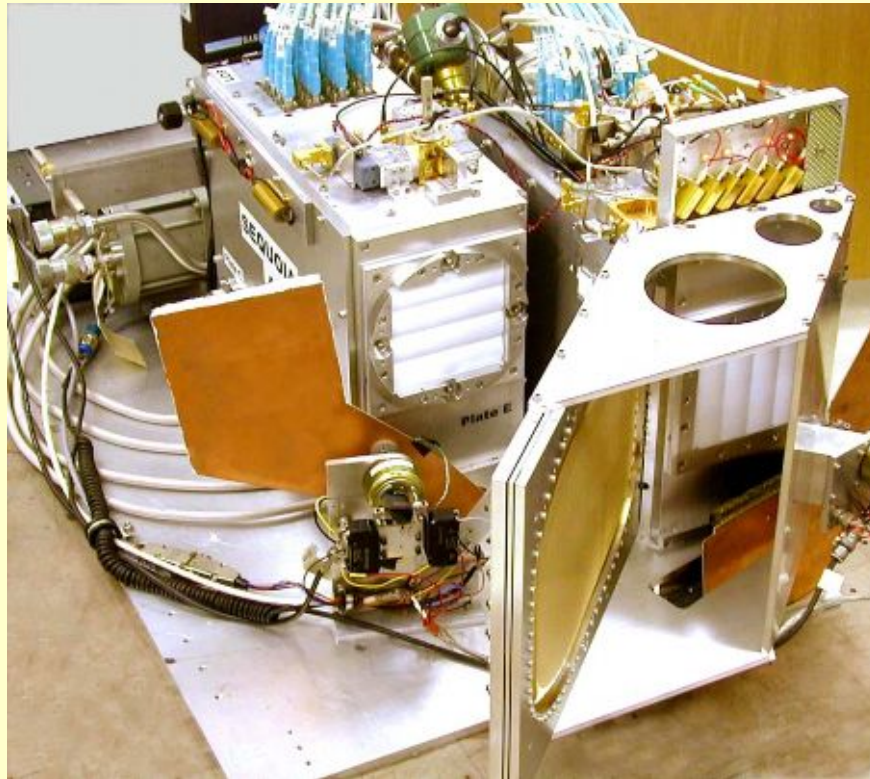


Sensitivity of Redshift Receiver

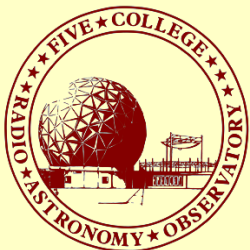




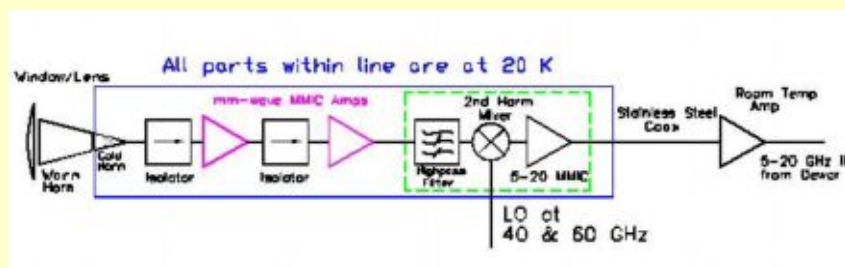
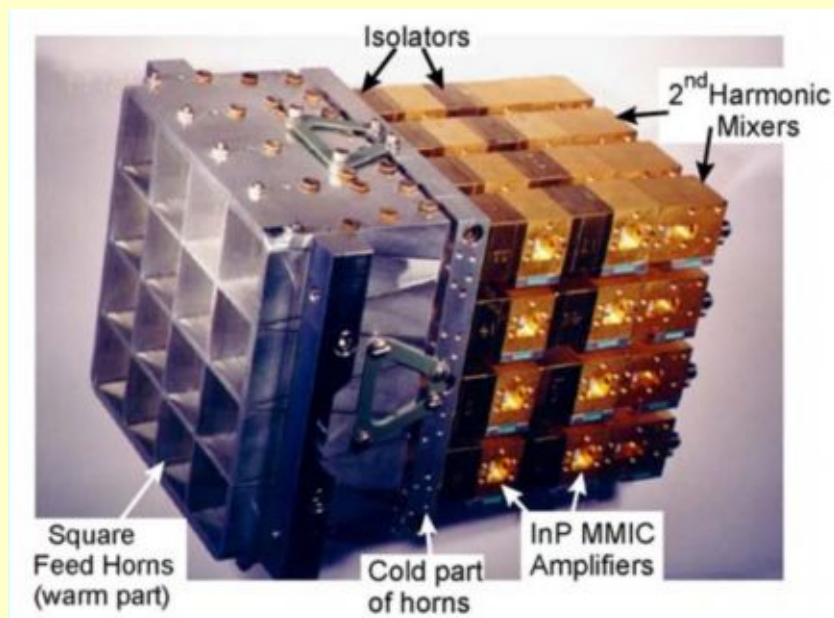
Imaging the Interstellar Medium with SEQUOIA



- 32-element focal plane array for $\lambda 3\text{mm}$
- MMIC amplifiers
- High Sensitivity
 - $T_{\text{Receiver}} \sim 60\text{K}$
- 15 GHz Instantaneous Bandwidth
 - Allows multiple lines to be observed

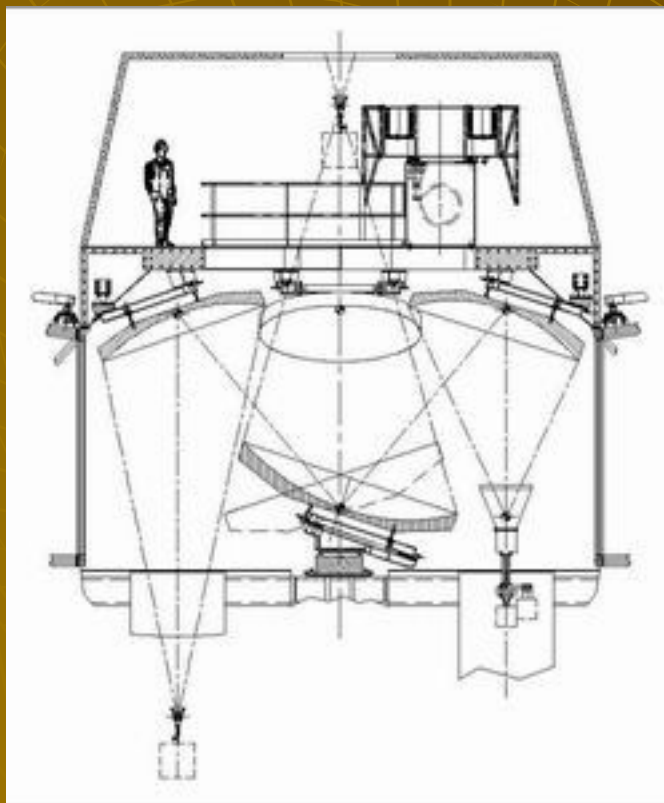


System Description



- SEQUOIA is a cryogenic focal plane array designed for the 85-115.6 GHz range.
- 32 pixels are arranged in a dual-polarized 4x4 array.
- The system uses InP MMIC preamplifiers with 35-40dB gain.
- The noise temperature ranges from 50-80K over most of the band.
- No mechanical or electrical tuning is used.
- In each pixel, the preamplifier is followed by a subharmonic mixer with an IF band from 5-20GHz.
- The entire signal band is covered with single sideband response using just two LO's, at 40GHz and 60GHz.

64-м радиотелескоп на Сардинии (SRT)



- ◆ Приемники для SRT практически полностью (за некоторыми исключениями на низких частотах вследствие антропогенных помех) перекрывают диапазон от ~ 0.3 до ~ 100 ГГц.
- ◆ Низкочастотные приемники будут размещаться в первичном фокусе, более высокочастотные – в фокусе BWG, а приемники высокочастотных диапазонов – в фокусе Грегори.
- ◆ Все приемники рассчитаны на две поляризации и строятся по однотипной схеме с общим опорным сигналом для фазовой стабилизации гетеродинов.
- ◆ Приемник на 23 ГГц – 7-лучевой.

Band (Name)	ν_0 (GHz)	λ (cm)	Receiver N°	ν_{Lsky} (GHz)	ν_{Hsky} (GHz)	$\frac{\Delta \nu}{\nu_c}$ (%)	Receiver's band (MHz)	Noise temperature (K)	Configuration
P	<u>0.3</u>	90	1P	0.31	0.42	12	2X110	30	Coaxial 1.5 GHz
L	0.6	50	1P	0.58	0.62	7	2X40	25	
L	1	30	1P	0.70	1.30	60	2X600		
L	<u>1.5</u>	18-21	2P	1.30	1.80	32	2X500	5	Coaxial 0.3 GHz
S	2	13	2P	2.20	2.36	7	2X160		Coaxial 8 GHz
S	3	10	3P	2.36	3.22	27	2X860		
S	4	7.5	3P	3.22	4.30	32	2X1080		
C	5	6	1B	4.30	5.80	32	2X1500	15	
C	<u>7</u>	5	2B	5.70	7.70	30	2X2000	15	Monofeed
X	8	3.6	2P	8.18	8.98	9	2X800		Coaxial 2 GHz
X	9	3.3	1G	7.50	10.40	32	2X2000	10	
Ku	13	2.3	2G	10.30	14.40	33	2X2000	14	
Ku	17	1.8	3G	14.40	19.80	32	2X2000	18	
K	<u>23</u>	1.3	4G	19.00*	26.50	33	2X2000	21	Multifeed (7 elements)
Ka	32	0.9	5G	26.00	36.00	32	2X2000	25	
Q	43	0.7	6G	35.00	50.00	31	2X2000	40	
E	86	0.4	7G	70.00	90.00	25	2X2000	90	
W	100	0.3	8G	90.00	115.00	25	2X2000	100	

Planck receivers

LFI PERFORMANCE GOALS^a

INSTRUMENT CHARACTERISTIC	CENTER FREQUENCY [GHz]		
	30	44	70
InP HEMT Detector technology		MIC	MMIC
Detector temperature		20 K	
Cooling system		H ₂ Sorption Cooler	
Number of feeds	2	3	6
Angular resolution [arcminutes FWHM]	33	24	14
Effective bandwidth [GHz]	6	8.8	14
Sensitivity [mK Hz ^{-1/2}]	0.17	0.20	0.27
System temperature [K]	7.5	12	21.5
Noise per 30' reference pixel [μ K]	6	6	6
$\Delta T/T$ Intensity ^b [$10^{-6} \mu$ K/K]	2.0	2.7	4.7
($\Delta T/T$) Polarisation (Q and U) ^b [μ K/K]	2.8	3.9	6.7
Maximum systematic error per pixel [μ K]	< 3	< 3	< 3

^a All subsystems are designed to reach or exceed the performances of this table.

^b Average 1σ sensitivity per pixel (a square whose side is the FWHM extent of the beam), in thermodynamic temperature units, achievable after 2 full sky surveys (14 months).

Planck receivers

HFI PERFORMANCE GOALS^a

INSTRUMENT CHARACTERISTIC	CENTER FREQUENCY [GHz]					
	100	143	217	353	545	857
Spectral resolution $\nu/\Delta\nu$	3	3	3	3	3	3
Detector technology	Spider-web and polarisation-sensitive bolometers					
Detector temperature	0.1 K					
Cooling system	20 K Sorption Cooler + 4 K J-T + 0.1 K Dilution					
Number of spider-web bolometers	0	4	4	4	4	4
Number of polarisation-sensitive bolometers	8	8	8	8	0	0
Angular resolution [FWHM arcminutes]	9.5	7.1	5.0	5.0	5.0	5.0
Detector Noise-Equivalent Temperature [$\mu\text{Ks}^{0.5}$]	50	62	91	277	1998	91000
$\Delta T/T$ Intensity ^b [$10^{-6}\mu\text{K/K}$]	2.5	2.2	4.8	14.7	147	6700
$\Delta T/T$ Polarisation (U and Q) ^b [$10^{-6}\mu\text{K/K}$]	4.0	4.2	9.8	29.8
Sensitivity to unresolved sources [mJy]	12.0	10.2	14.3	27	43	49
ySZ per FOV [10^{-6}]	1.6	2.1	615	6.5	26	605

^a Goal sensitivities. All subsystems have been designed to reach or exceed the performances of this table, which are expected to be achieved in orbit. Sensitivity requirements are a factor of two worse, and would still achieve the core scientific objectives of the mission.

^b Average 1σ sensitivity per pixel (a square whose side is the FWHM extent of the beam), in thermodynamic temperature units, achievable after 2 full sky surveys (14 months).

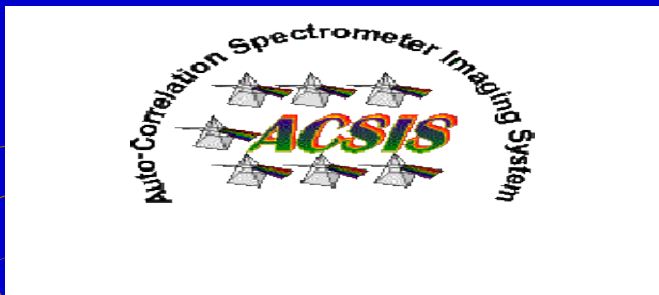
Спектроанализаторы

- ◆ В настоящее время на описанных радиотелескопах используются различные виды спектроанализаторов: фильтровые, акустооптические, автокорреляционные.
- ◆ В последнее время появились быстродействующие спектроанализаторы на основе быстрого преобразования Фурье, которые по своим параметрам превосходят все перечисленные выше. Сейчас реализованы такие спектроанализаторы с полосой анализа 1 ГГц и числом каналов 32768. В ближайшее время эти величины будут, видимо, удвоены. Можно ожидать, что в ближайшей перспективе это будет основной вид спектроанализаторов.
- ◆ В то же время следует отметить и другие перспективные разработки, например, сверхширокополосный аналоговый автокоррелятор (LMT), который полностью покрывает полосу приема «приемника красного смещения» на LMT (36 ГГц) с разрешением 31 МГц.

Overwhelming advantages of FFT Spectrometers:

————→ *FPGAs: Field-Programmable Gate Arrays*

- ADC with 8 or 10 bit sampling (ACs: 2bit)
 - ⇒ higher sensitivity, no need for total power detectors
 - ⇒ Much higher dynamic range → Leveling much simpler ⇒ simplification of IF module
- 100% mass production chips → no custom made chips → much better reaction to markets → take full advantage of Moore's law
- very high channel numbers:
 - Today: 1 GHz/32768 channels
 - Soon (1 – 2 yrs): 2 GHz/65536 channels
- Very high degree of integration: Integration of a complete spectrometer (digital filters, windows, FFT, power builder and accumulator) of one chip (AC's use cascaded chips →
 - can be re-programmed
 - much lower power consumption (more reliable)

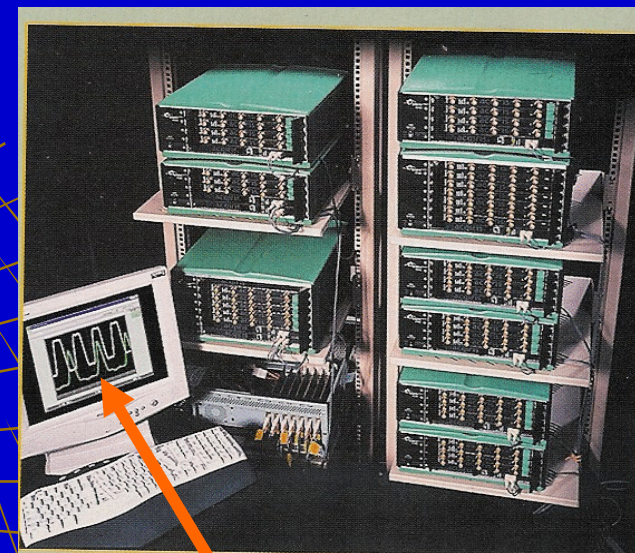


DRAO/ROE/DAO/NRAO

http://www.drao-ofr.hia-ihh.nrc-cnrc.gc.ca/science/jcmt_correlator/

<http://www.acqiris.com/>

FFTS



Correlators

IF racks

Data reduction machine

FFTS data reduction "machine"

32 x 0.8 GHz (32 x 1024 channels)

40 x 1 GHz (40 x 32768 channels)

$\Delta\nu = 1 \text{ MHz} \leftrightarrow \Delta v = 1\text{km/s}@300 \text{ GHz}$

$\Delta\nu = 30 \text{ kHz} \leftrightarrow \Delta v = 0.03\text{km/s}@300 \text{ GHz}$

Выводы

- ◆ Аппаратурно-приемные комплексы включают в себя набор разнообразных инструментов, перекрывающих широкий диапазон частот (самый широкий – на SRT, от 0.3 ГГц до 100 ГГц).
- ◆ В большинстве случаев приемники размещаются стационарно в фокусе Нэсмита. Такой вариант обеспечивает максимальное пространство для их установки и максимальное удобство в обслуживании.
- ◆ Большинство приемников – однолучевые. В то же время на всех рассмотренных радиотелескопах имеются и многолучевые системы, как на основе болометров для наблюдений в континууме, так и на основе супергетеродинной техники для спектральных наблюдений. Число элементов достигает 144 для матриц болометров и 32 для матриц гетеродинных приемников. Ожидается значительное увеличение размеров матриц в недалеком будущем.
- ◆ На частотах до ~ 100 ГГц новые приемники строятся на основе ММС усилителей (с мгновенной полосой до 36 ГГц). Ожидается, что в ближайшие годы матричные приемники на основе этой технологии будут иметь порядка 100 и более элементов. На более высоких частотах пока используются СИС смесители.
- ◆ На описанных радиотелескопах используются различные виды спектроанализаторов: фильтровые, акустооптические, автокорреляционные. Однако в последнее время появились быстродействующие спектроанализаторы на основе быстрого преобразования Фурье, которые по своим параметрам превосходят все перечисленные выше. Следует отметить сверхширокополосный аналоговый автокоррелятор (LMT), который полностью покрывает полосу приема «приемника красного смещения» на LMT (36 ГГц).

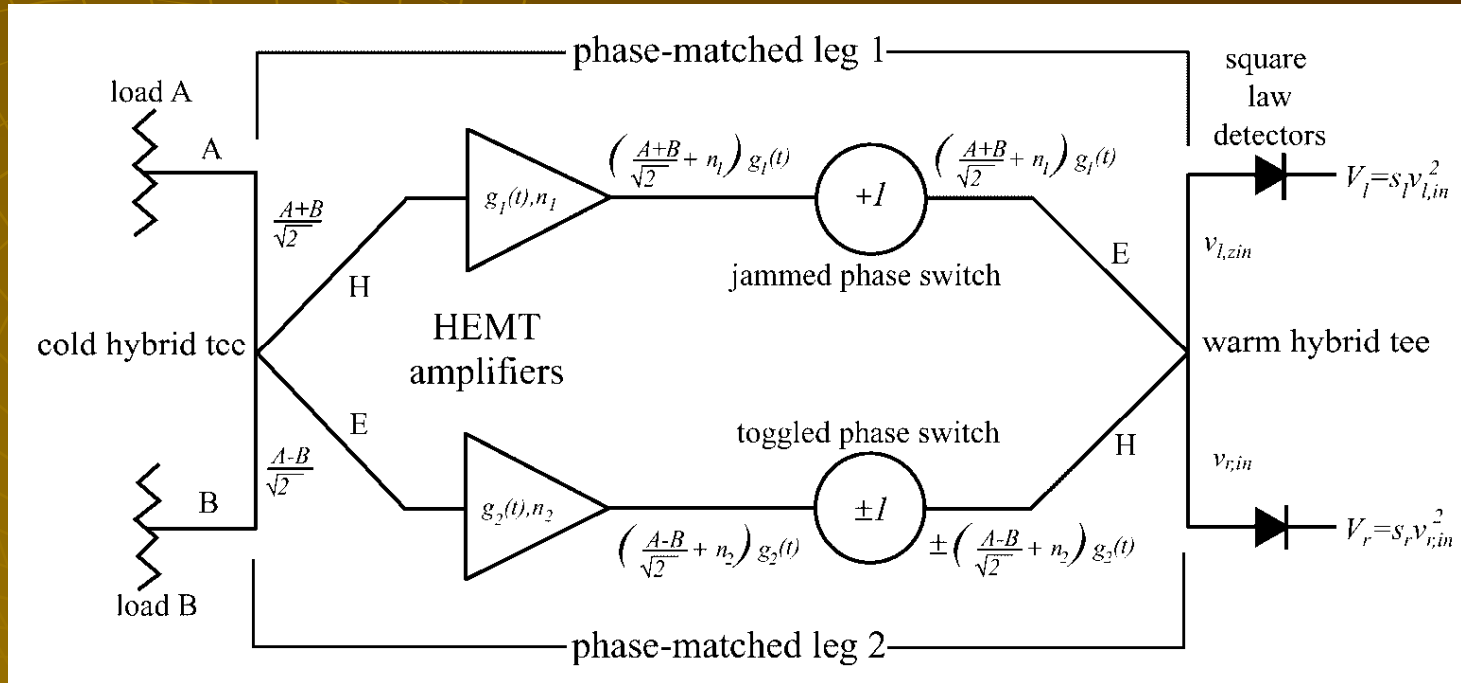
Состав приемного комплекса для РТ-70 (Суффа)

- ◆ Однолучевые приемники (континуум, РСДБ, спектральные линии):
 - ??Длинноволновые приёмники (метровый, дециметровый) возможно
 - 22 ГГц (1,35 см) (HEMT, 20 К, 2 поляризации)
 - 37 ГГц (8 мм) (HEMT, 20 К, 2 поляризации)
 - ?75 ГГц (4 мм)
 - 80-115 ГГц (3 мм) (HEMT, 20 К, 2 поляризации)
 - ?150 ГГц (2 мм)
 - 200-270 ГГц (1,3 мм) (SIS, 4 К, 2 поляризации, ?HEMT)
 - ?350 ГГц (0,8 мм) (SIS) (почти безнадежно)
- ◆ Матричные приемники:
 - Матрицы болометров на 1.3 мм и на 2 мм (0.3 К) с максимально возможным числом элементов
 - Матричный приемник на 80-115 ГГц (HEMT, 20 К, континуум, спектральные линии) и/или матричный гетеродинный приемник на 210-270 ГГц (SIS, 4 К)
- ◆ Технологические приёмники:
 - Вспомогательные приемники для радиоголографии
 - Приёмники для исследования астроклимата

Ожидаемые параметры

Диапазон	22	37	85-115	200-270
Технология	HEMT	HEMT	HEMT	SIS
Раб. т-ра (К)	20	20	20	4
Полоса (ГГц)	8	8	16	16
$T_{ш}$ (К)	30	50	100	150
ΔT (мК·Гц ^{-1/2})	~ 1	~ 1	~ 2	~ 3
ΔS (мЯн·Гц ^{-1/2})	~ 1	~ 1	~ 3	~ 5

Pseudo-correlation radiometer

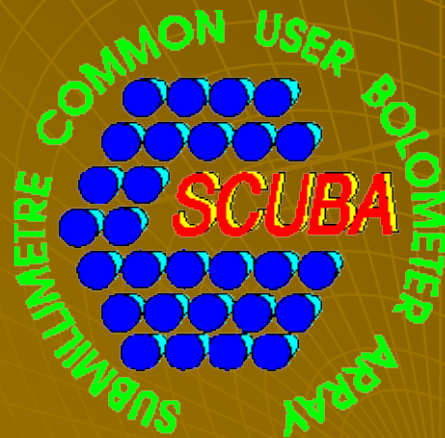


$$V_l = \frac{s}{2} \left\{ \left(\frac{A^2 + B^2}{2} + n_1^2 \right) g_1^2(t) + \left(\frac{A^2 + B^2}{2} + n_2^2 \right) g_2^2(t) \mp (A^2 - B^2) g_1(t) g_2(t) \right\},$$

$$V_r = \frac{s}{2} \left\{ \left(\frac{A^2 + B^2}{2} + n_1^2 \right) g_1^2(t) + \left(\frac{A^2 + B^2}{2} + n_2^2 \right) g_2^2(t) \pm (A^2 - B^2) g_1(t) g_2(t) \right\},$$

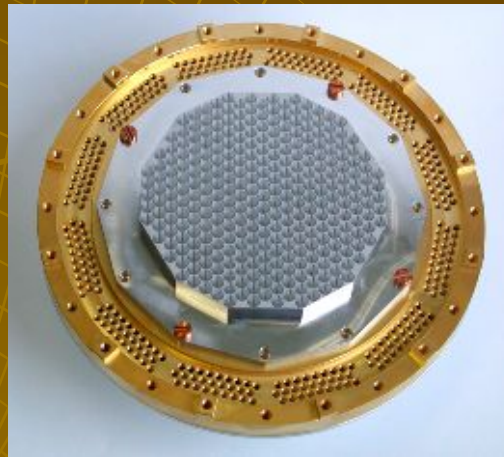
Bolometer arrays are getting ever larger:

SCUBA



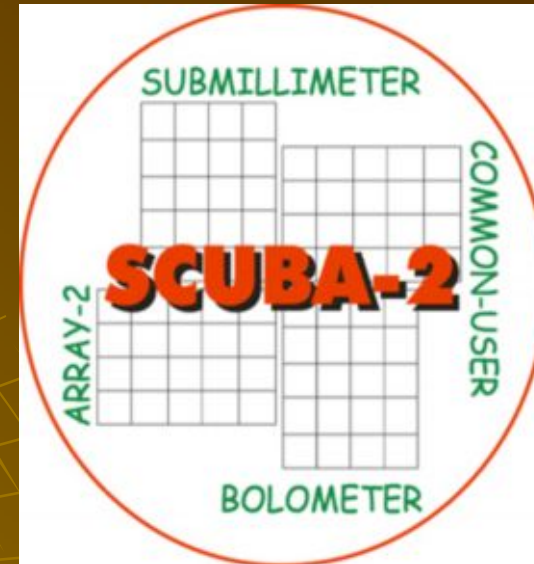
37 bolometers

LABOCA



295 bolometers

SCUBA-2



~5120 bolometers

In addition: MAMBO-II, Bolocam, SHARC-II, ...



«Создание приемных аппаратурных комплексов для обеспечения новых российских радиоастрономических проектов»

Серия научно-технических семинаров и совещаний

Научно-технический семинар в ИПФ РАН 13-15.06.07. Н.Новгород.

Совещание в АКЦ ФИ РАН 21.11.07

Совещание в ИПМАН РАН (СПб)

Совещание в АКЦ ФИ РАН 21.03.08 (Москва)



ИПФ РАН –
головой
разработчик
приемного
аппаратурного
комплекса
РТ-70



Аппаратурный комплекс радиотелескопа РТ-70 сегодня...

- ◆ В рамках подготовки ТЗ на аппаратурный комплекс (конец 2008 г) подготовлена концепция секториального размещения базовых приемников во вторичном фокусе РТ-70 (6 секторов по 60°)
- ◆ Стартовый приемник – совмещенный (один криостат) на одном луче двухчастотный двухполяризационный НЕМТ приемник на 22 и 37 ГГц, охлаждаемый до 20К.
- ◆ Второй приемник по мере достижения качества поверхности – совмещенный приемник на диапазоны 3 и 1.3 мм (СИС, охлаждение до 4 К). Приемники работают одновременно и в двух круговых поляризациях, дополнительная опция-механически переключаемый вместо приемника 1.3 мм приемник на волну 2 мм в том же криостате. Поляризационные каналы 3 мм приемников смещены по частоте на 15 ГГц (один 70-100 ГГц, второй 85-115 ГГц)
- ◆ Планируется использование первичного фокуса для приемников радиоголографии и, возможно, других приемников
- ◆ Создается и весной 2009г планируется к установке атмосферометрический приемник для мониторинга атмосферы