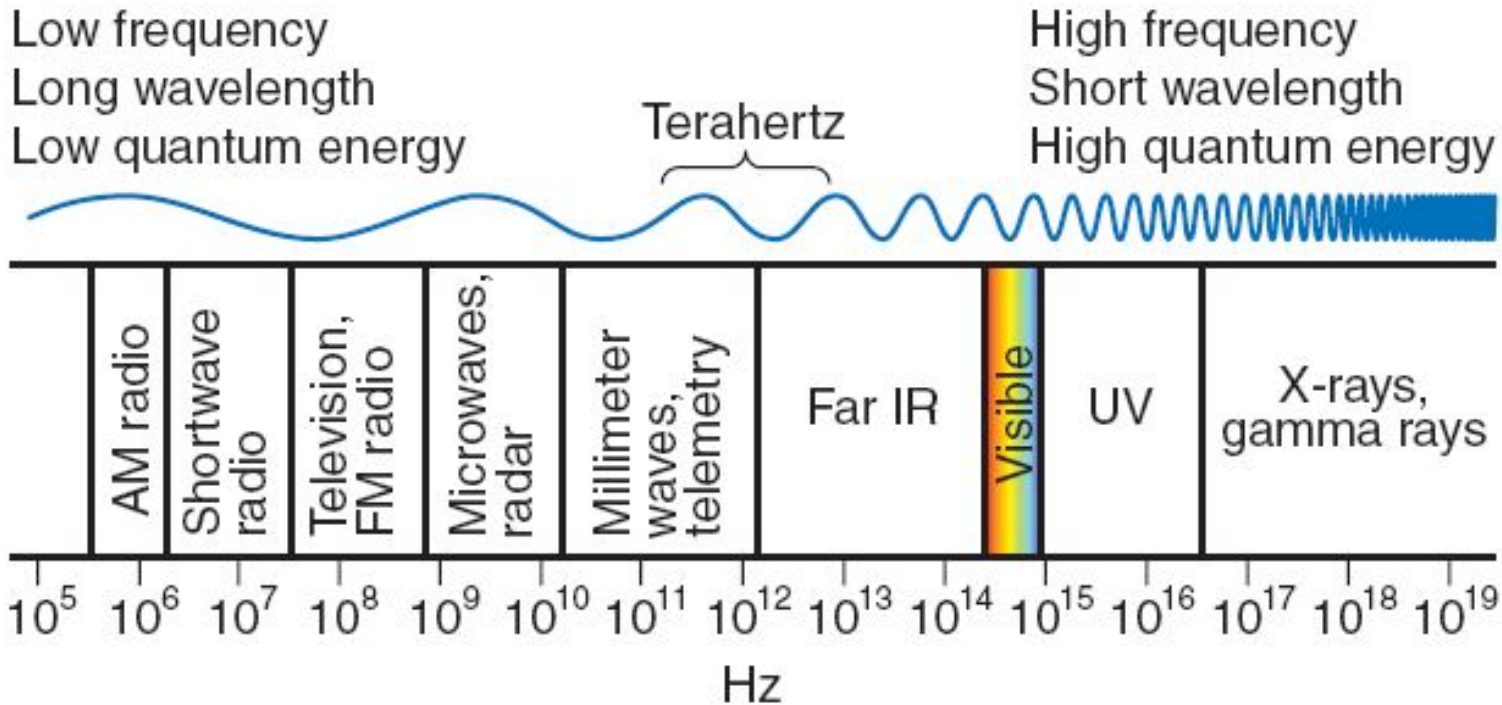


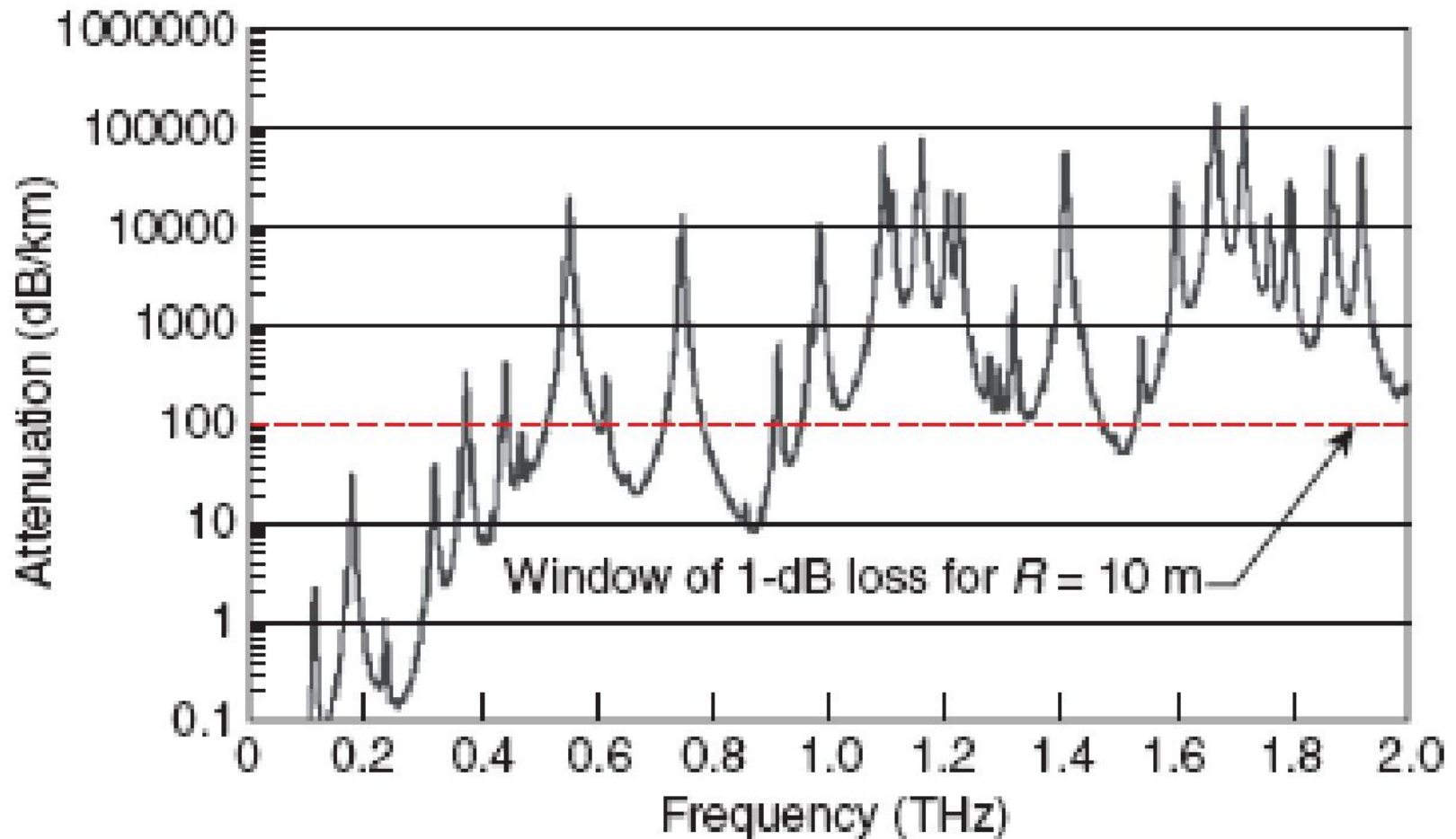
Криогенные детекторы терагерцового диапазона



Frequency (THz)	Wavenumber (cm ⁻¹)	Wavelength (μm)	Energy (meV)	Equivalent temperature (K)
0.1	3.33	3000	0.41	5
1.0	33.3	300	4.1	50
10.0	333	30	41	500
29.7	990	10.1 (CO ₂)	123	
282.0	9,398	1.064 (Nd:YAG)	1160	
474.0	15,797	0.633 (HeNe)	1960	

$$kT = E = \hbar \omega$$

Затухание на уровне моря

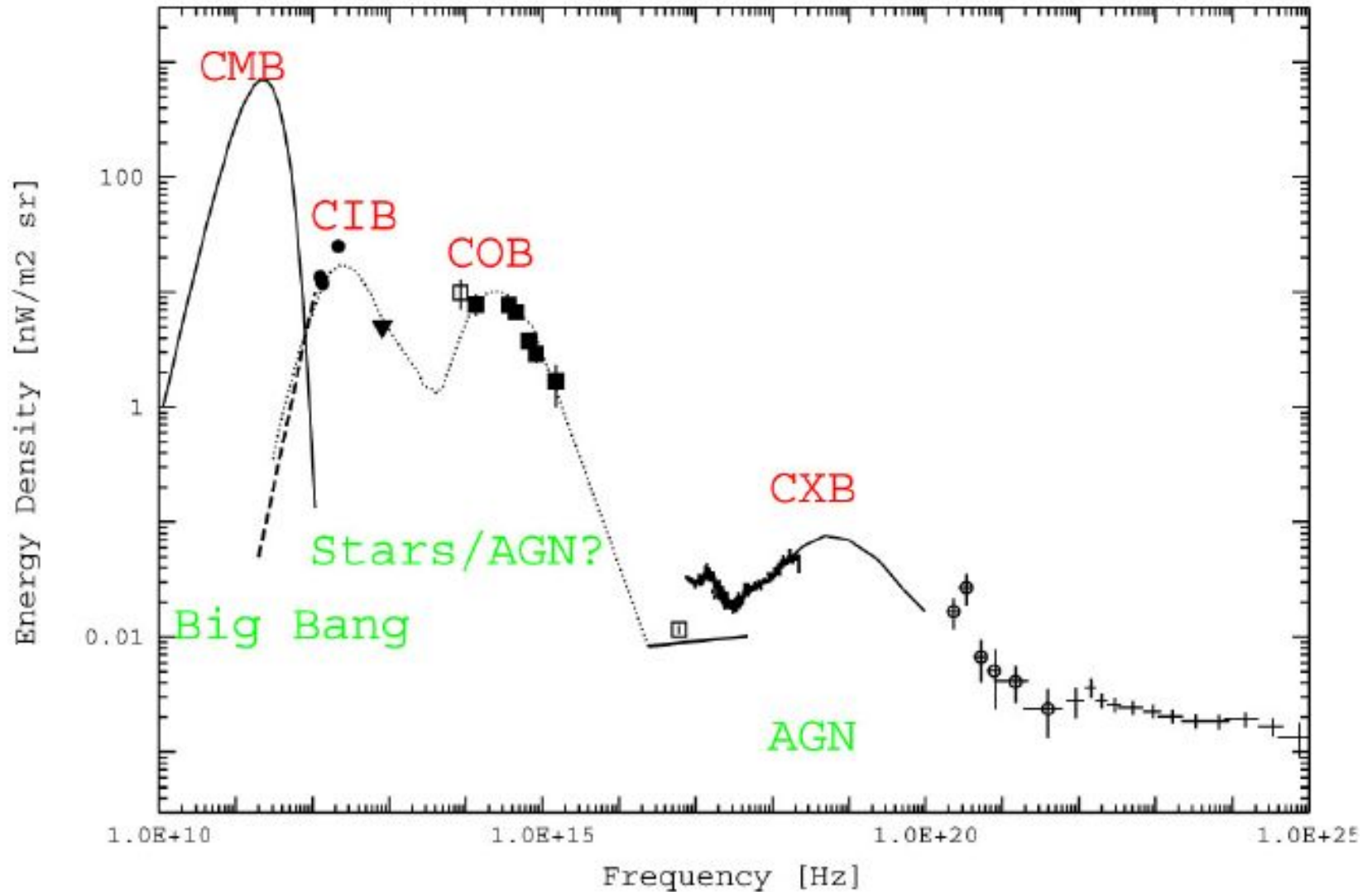


Два семейства методов

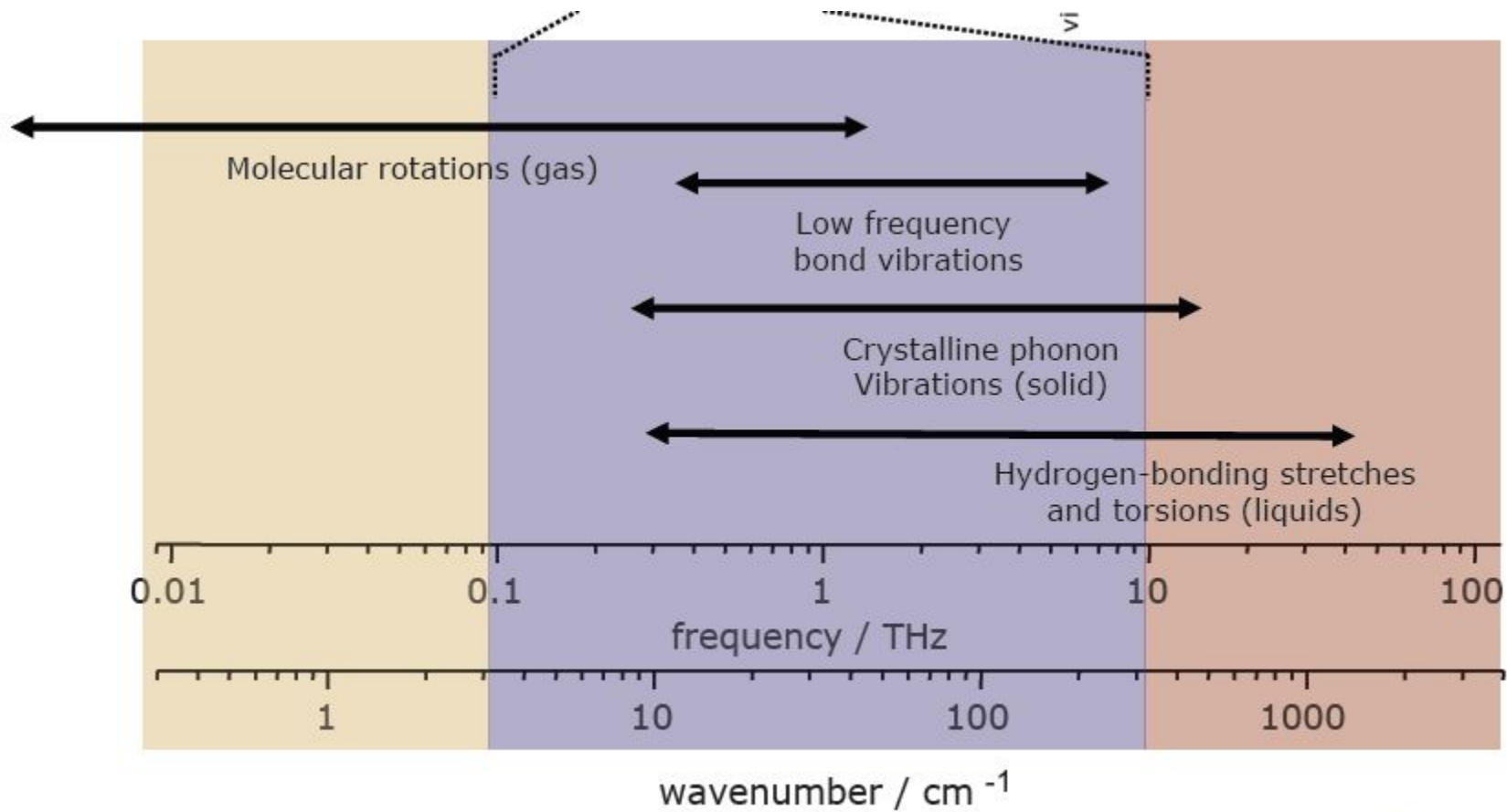
- **Понижение частоты квантово-оптических методов**
 - Низкое спектральное разрешение (ширина линии источников >10 кГц), акустооптика, брэгговские решетки, детекторы мощности
- **Увеличение рабочей частоты радиофизических методов**
 - Все функциональные элементы могут быть представлены в виде R,L,C эквивалентных схем
 - Супергетеродинные приемники. Источники гетеродина имеют высокую фазовую стабильность

Радиоастрономия

The Cosmic Energy Density Spectrum

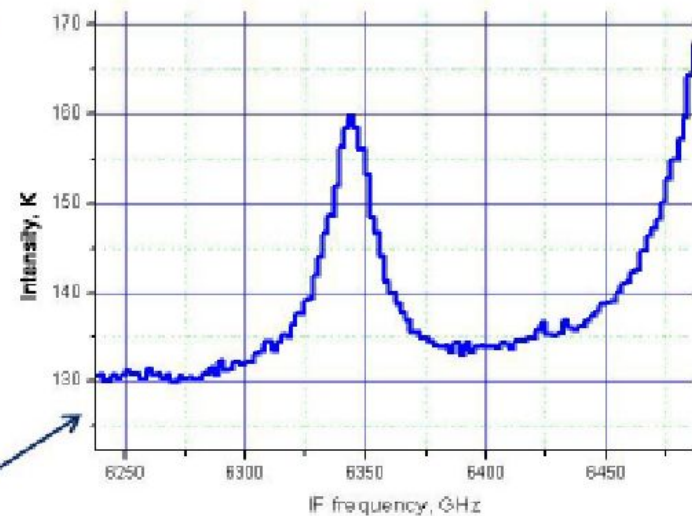
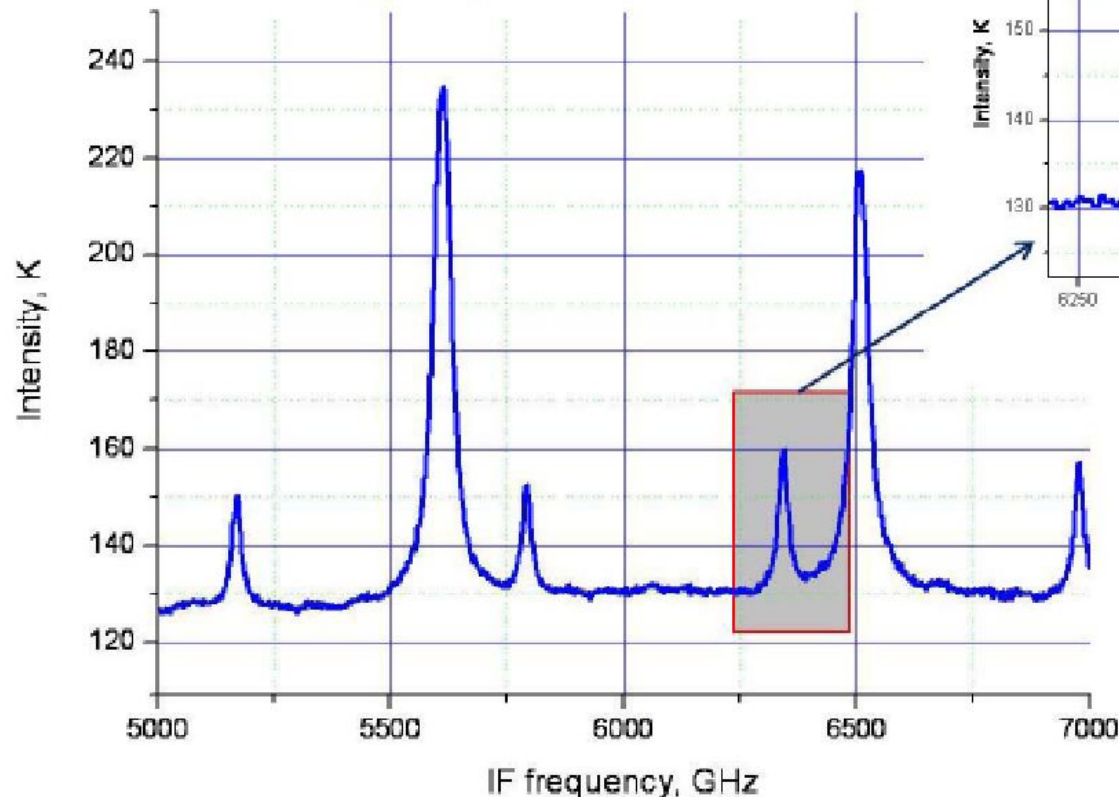


Спектроскопия



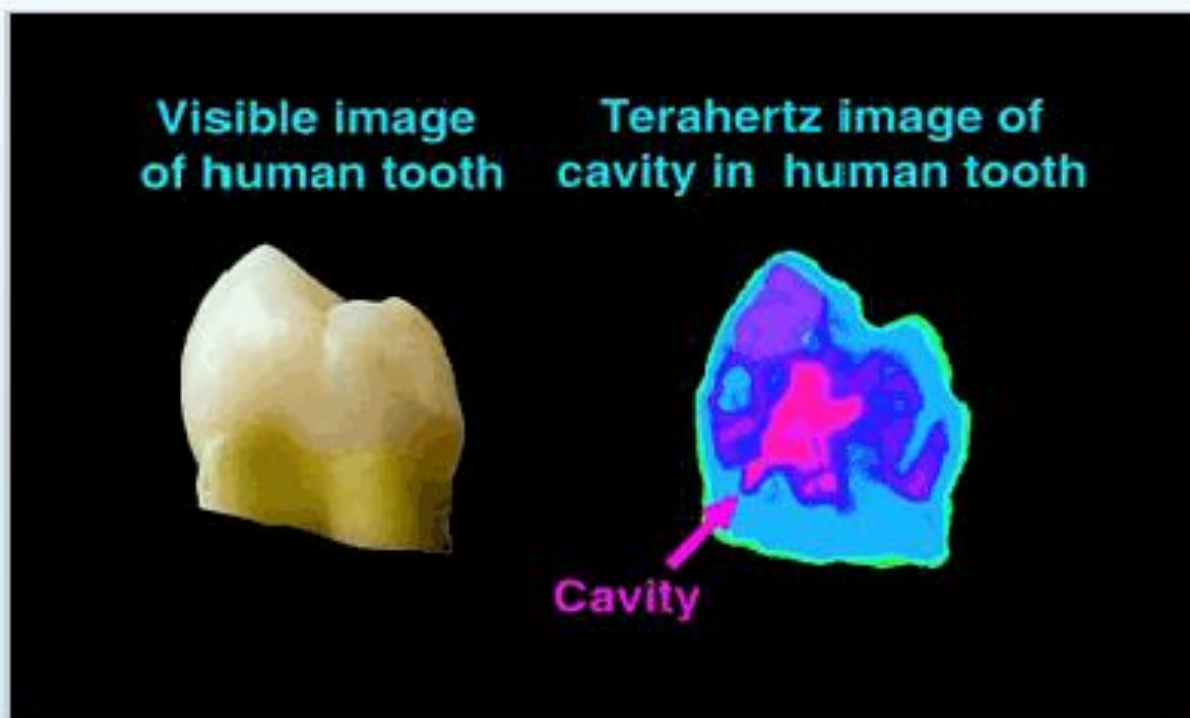
Пример спектра, измеренного гетеродинным методом

Deconvolved spectrum of the OCS emission lines at a gas pressure 2.6 mBar.
LO frequency 601 GHz.



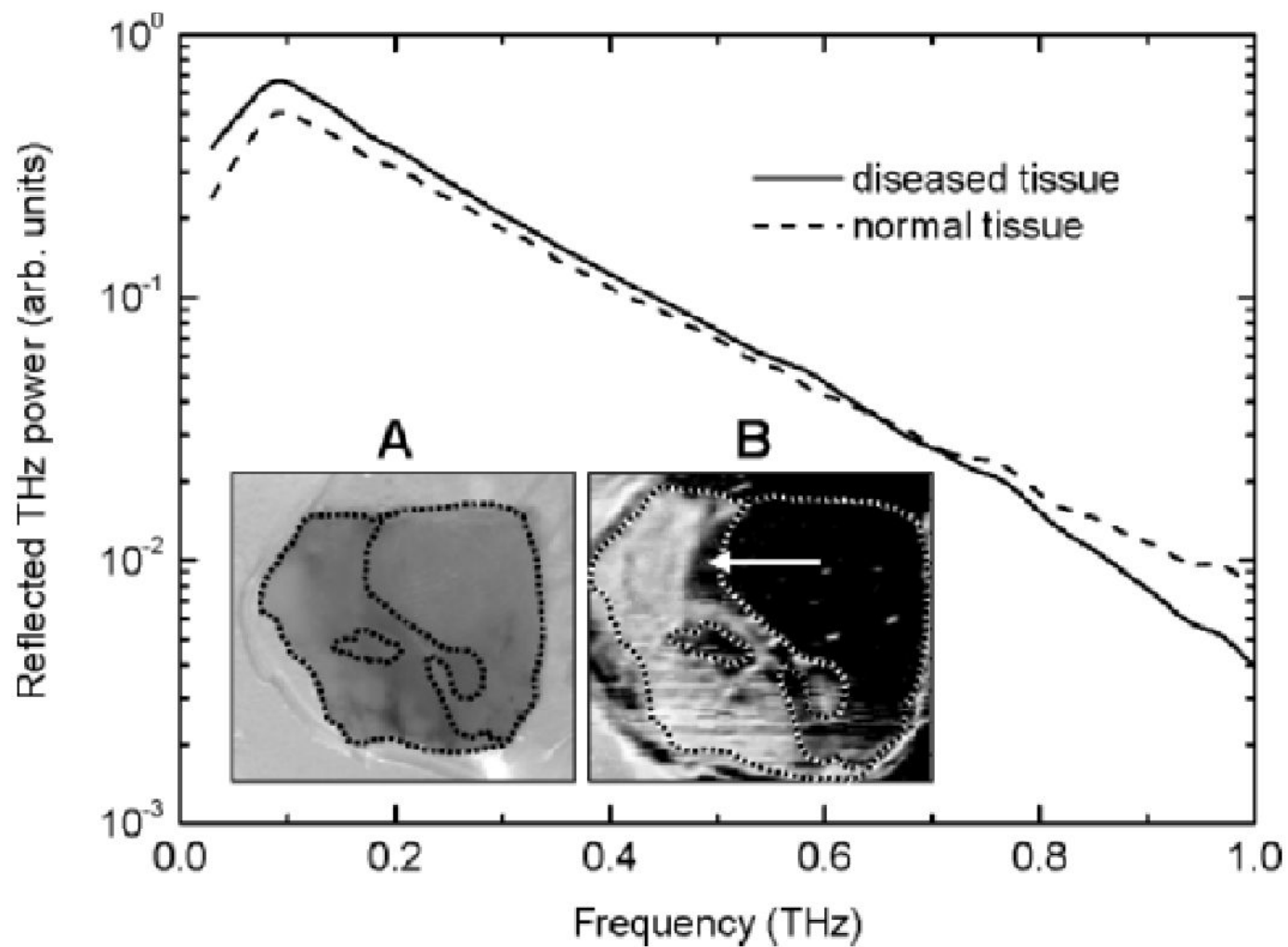
Two strong lines are saturated; weaker lines are not saturated isotopes.
The lines are detected, one in the LSB, the other one in the USB

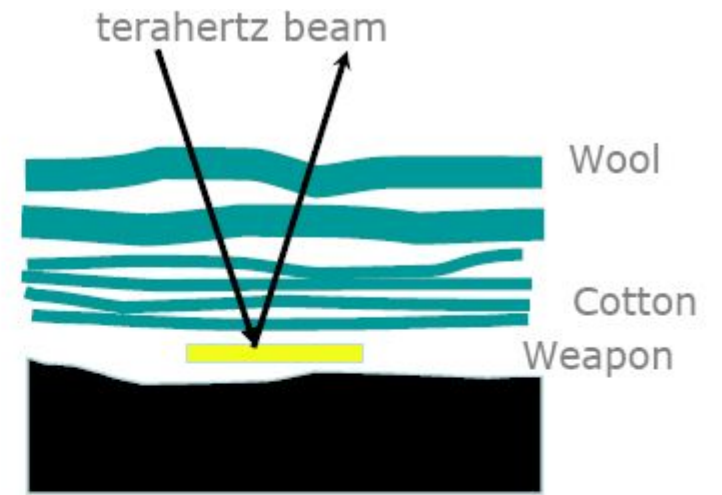
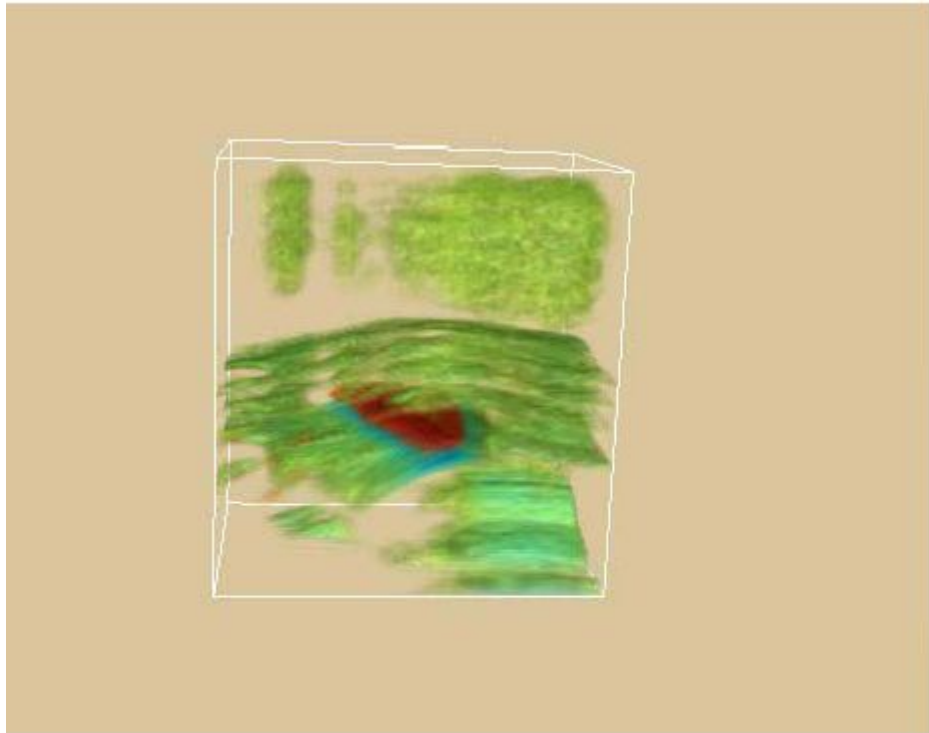
Медицинская диагностика



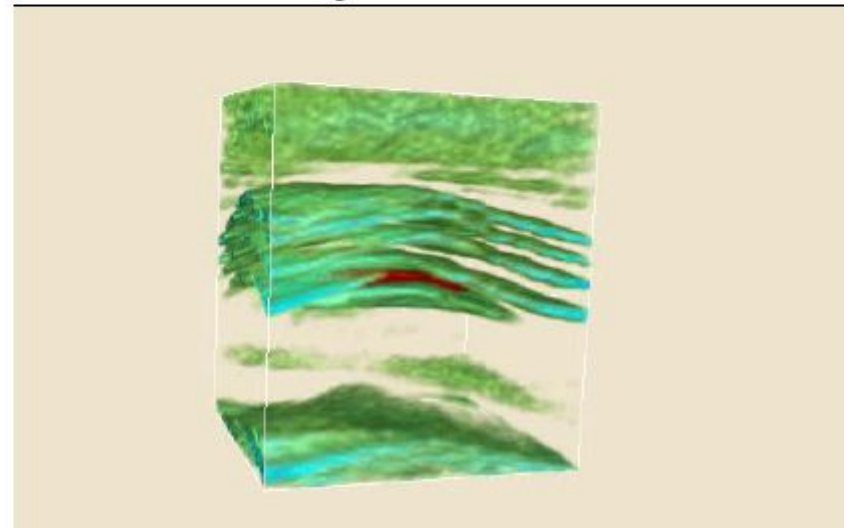
Crawley et al.
Caries Research
37(5):352-359
(2003)

Базально-клеточная карцинома

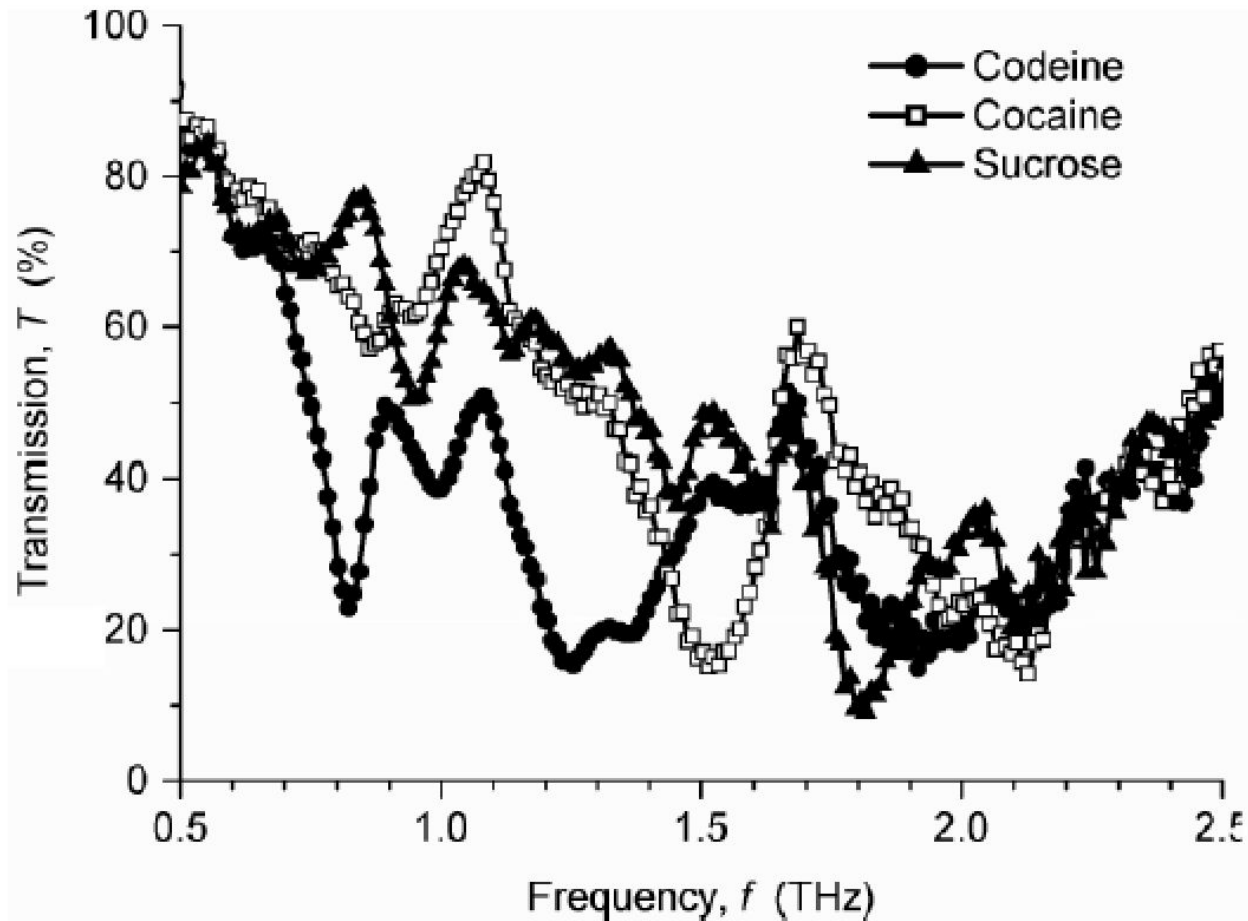




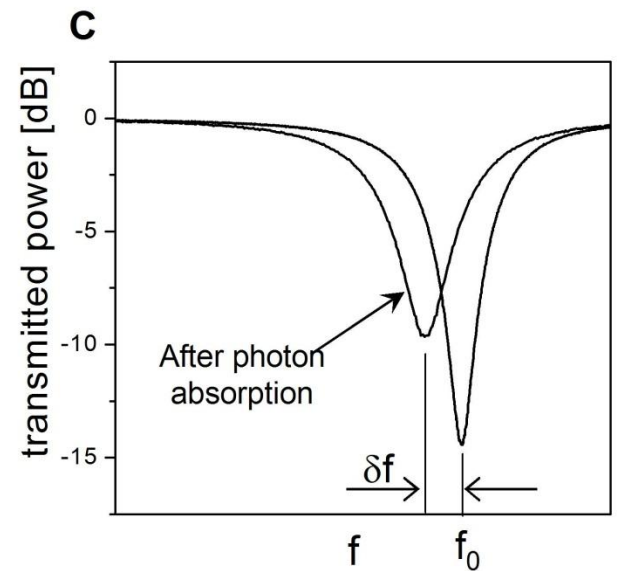
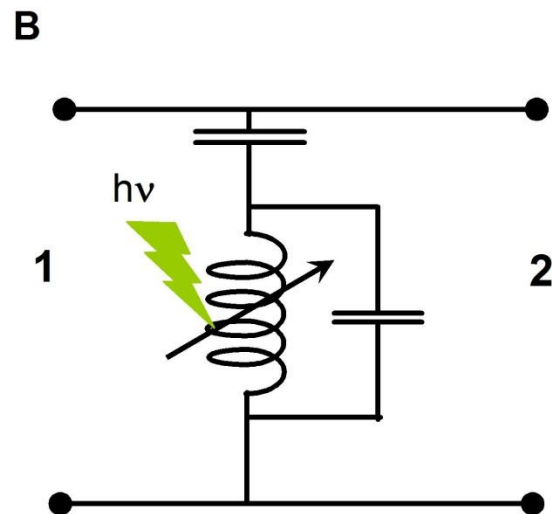
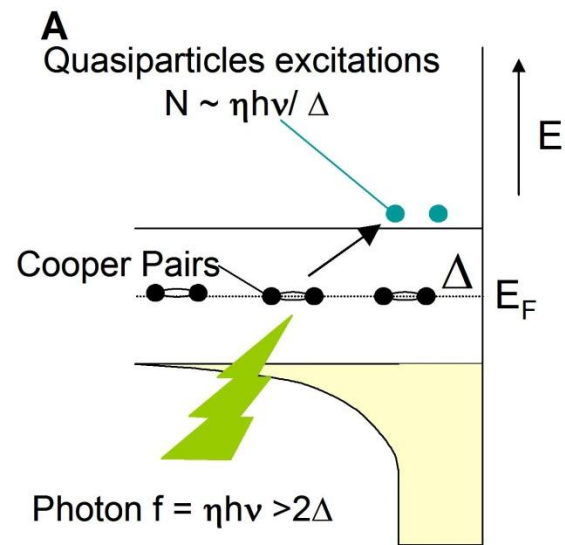
Subject's arm



Детектирование наркотических веществ



Детекторы кинетической ИНДУКТИВНОСТИ



Nb

CPW Resonator

Substrate

1

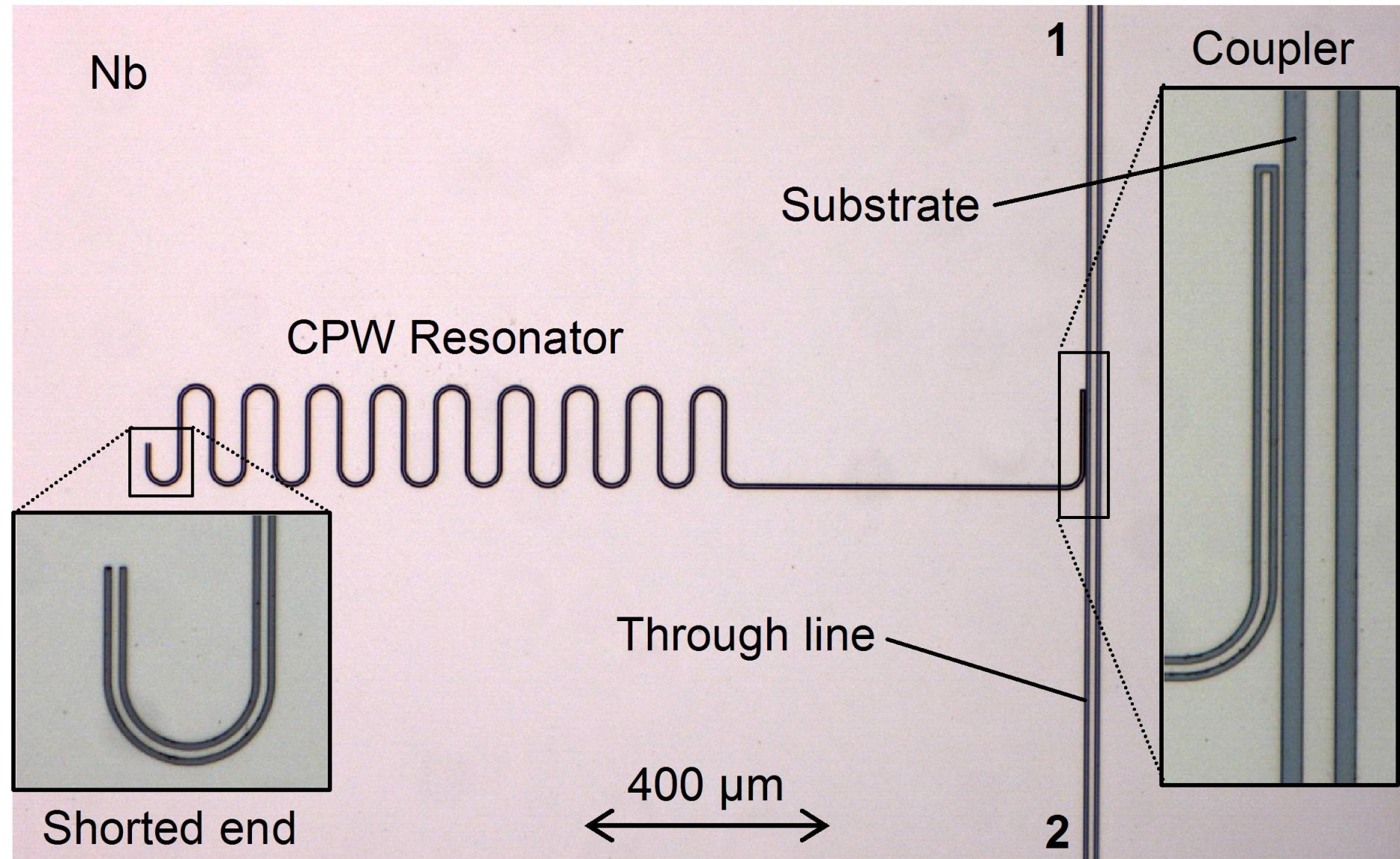
Coupler

Through line

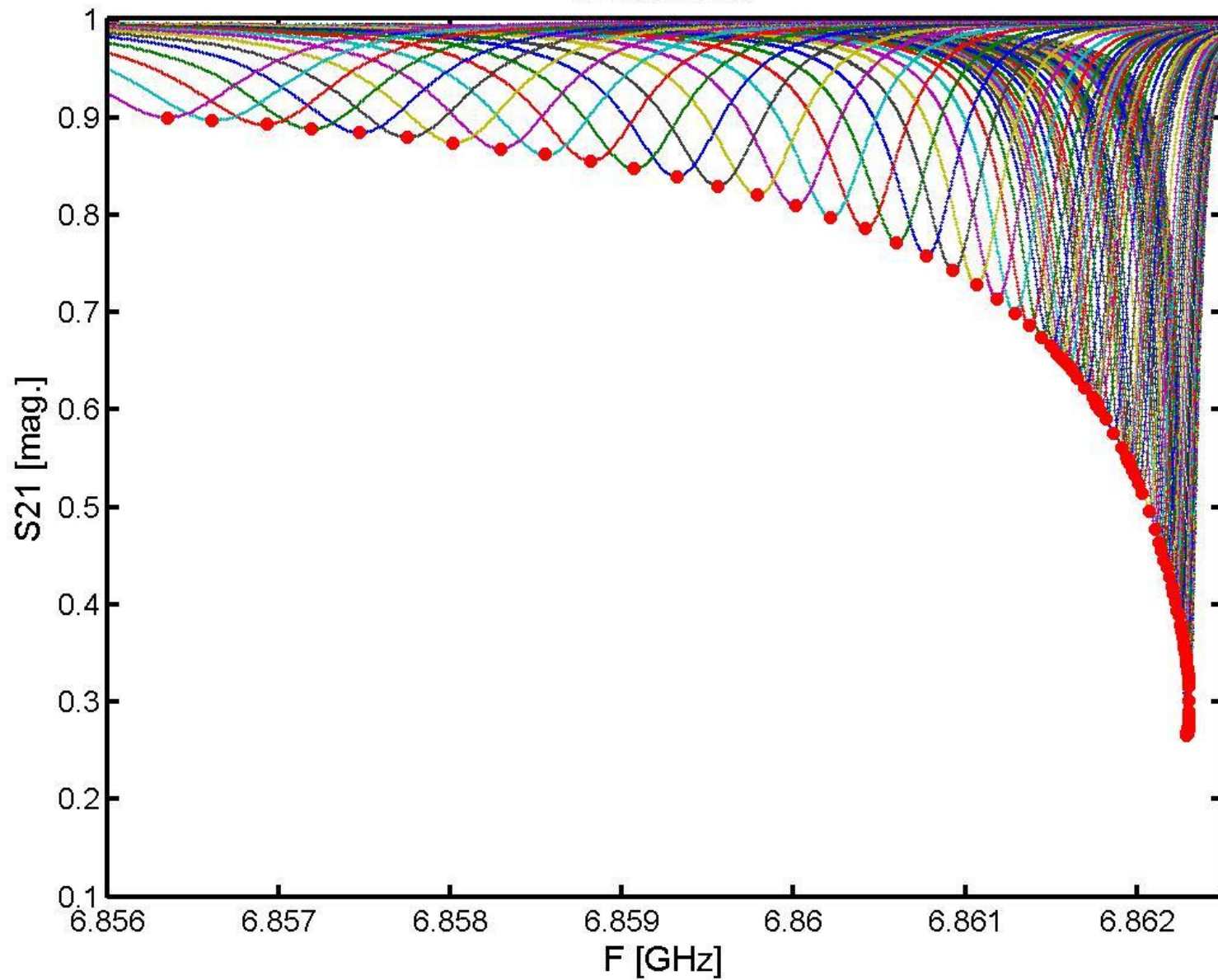
400 μm

Shorted end

2

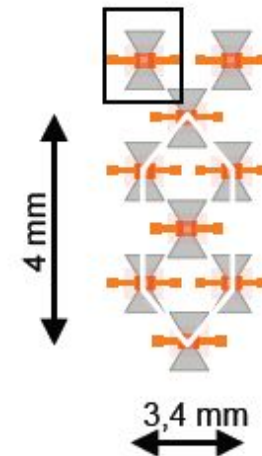
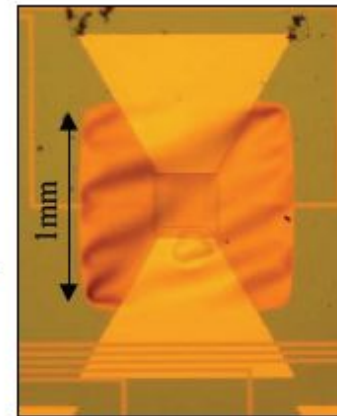
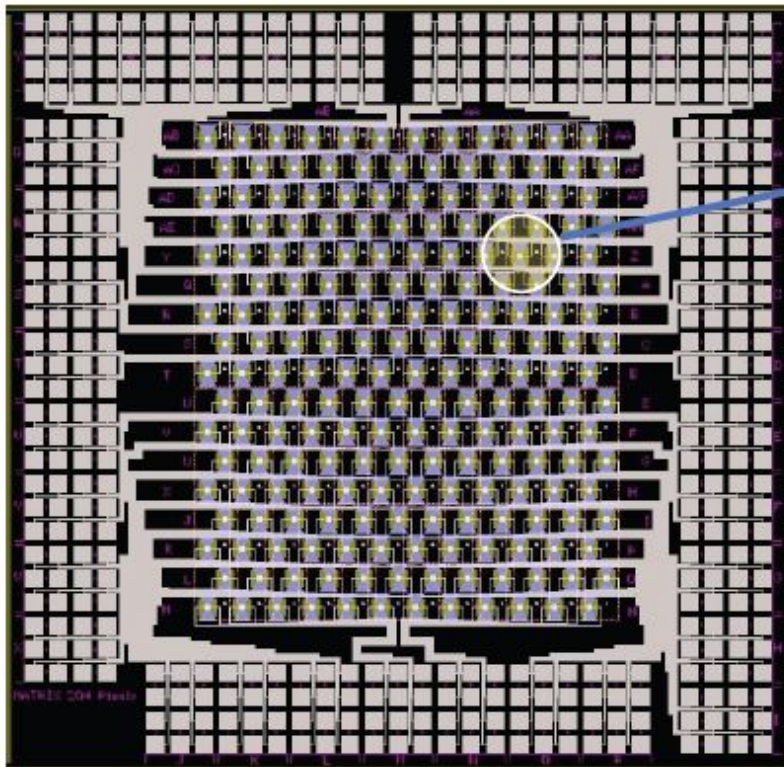


KID resonances



Детекторы с антенной

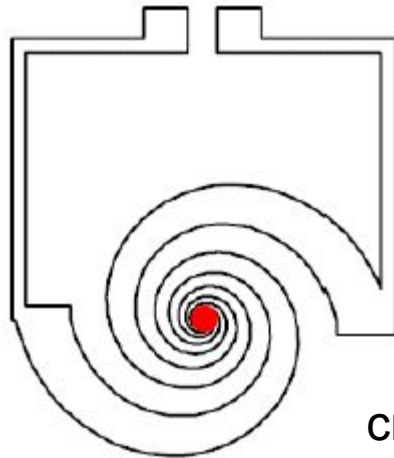
204 bolometers array with antennas



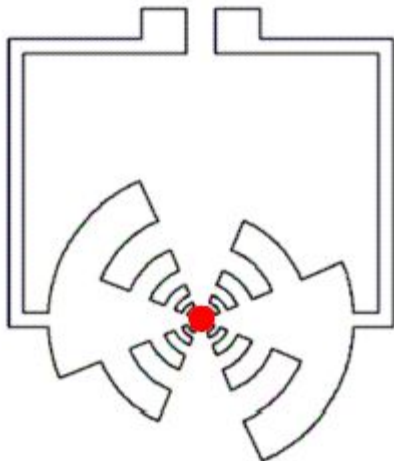
- Planar antenna network for imaging in millimeter wavelength
- Versatile fabrication process for future applications :
 - Polarisation sensitive detectors
 - Integrated frequency selection on the pixels
- Thermal sensor can be either high impedance or superconducting with NbSi

Примеры широкополосных антенн

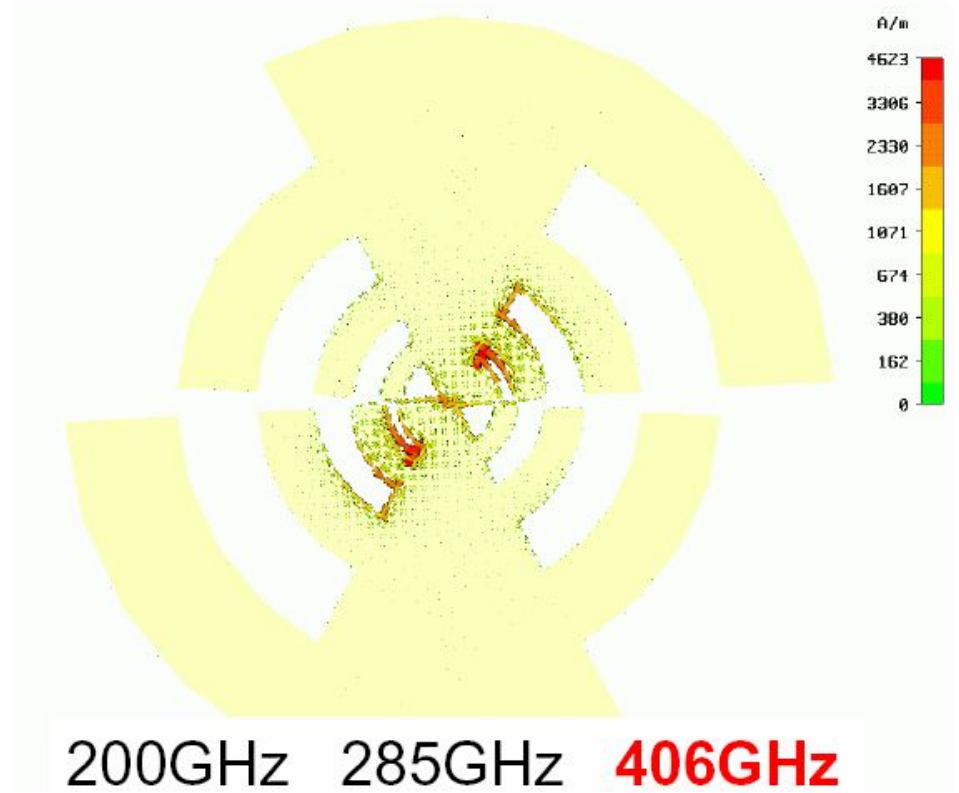
Поверхностные токи
логопериодической антенны



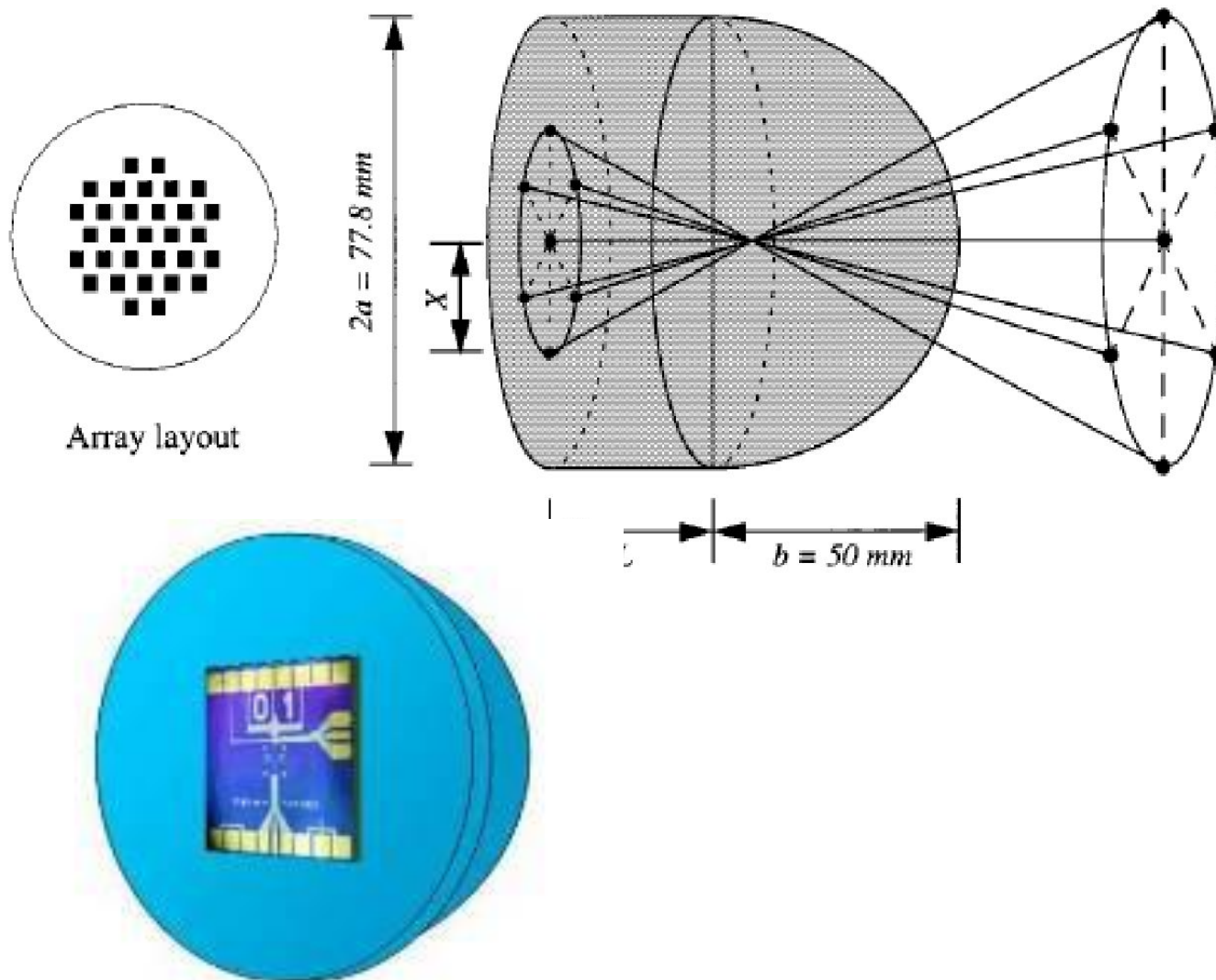
спиральная



логопериодическая

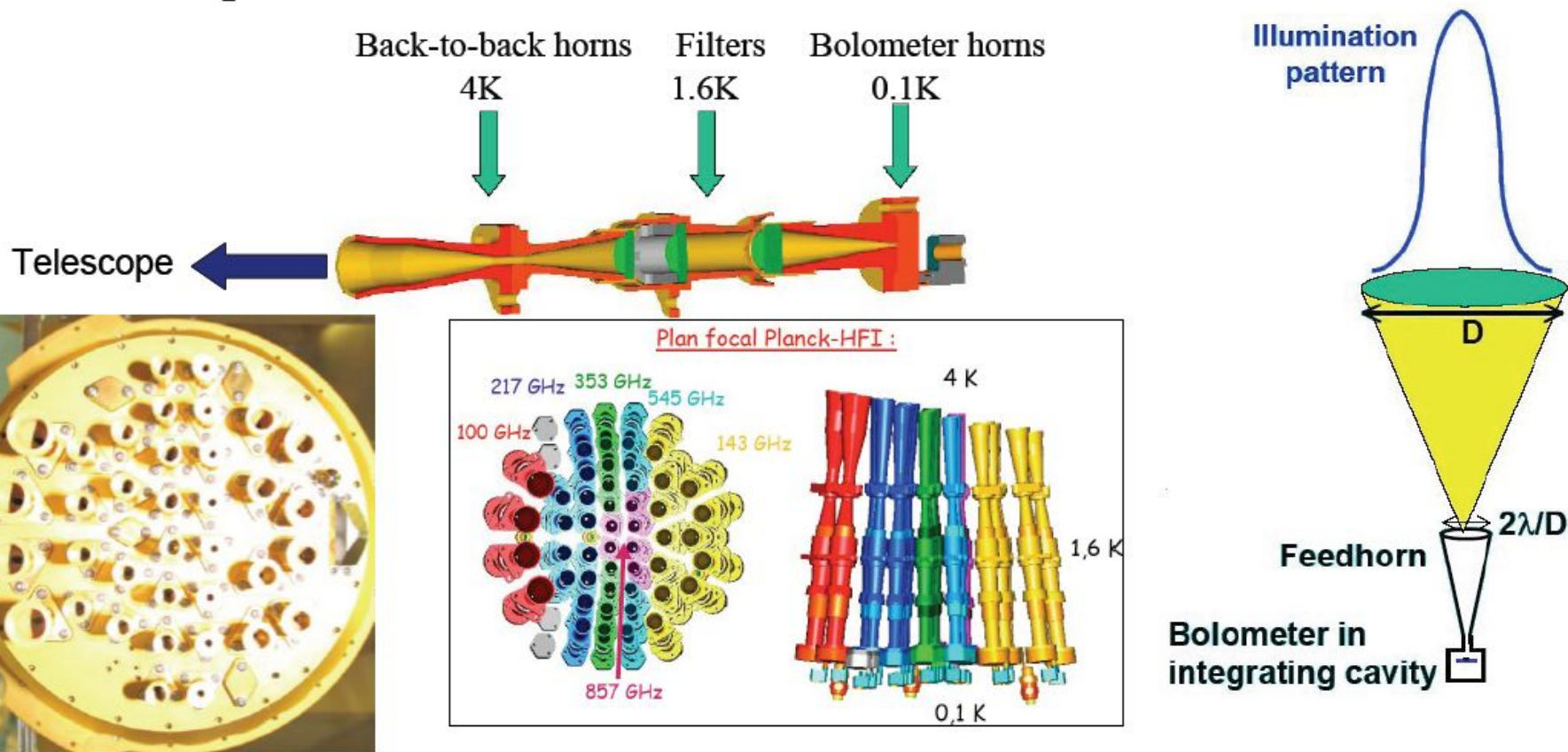


Размещение чипа на квазиоптической линзе



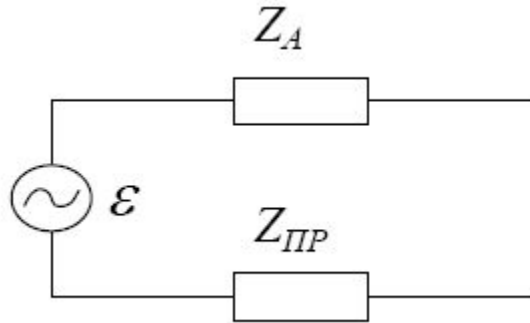
Волноводные конструкции

Example: Planck-HFI



Недостаток - узкополосность

Согласование антенны с приемником



Импеданс приемника $Z_{\text{пр}} = R_{\text{пр}} + iX_{\text{пр}}$

Импеданс антенны $Z_A = R_A + iX_A$

$$I = \frac{\varepsilon}{(Z_A + Z_{\text{ПР}})} \quad P_{\text{ПР}} = \frac{1}{2} I^2 R_{\text{ПР}}$$

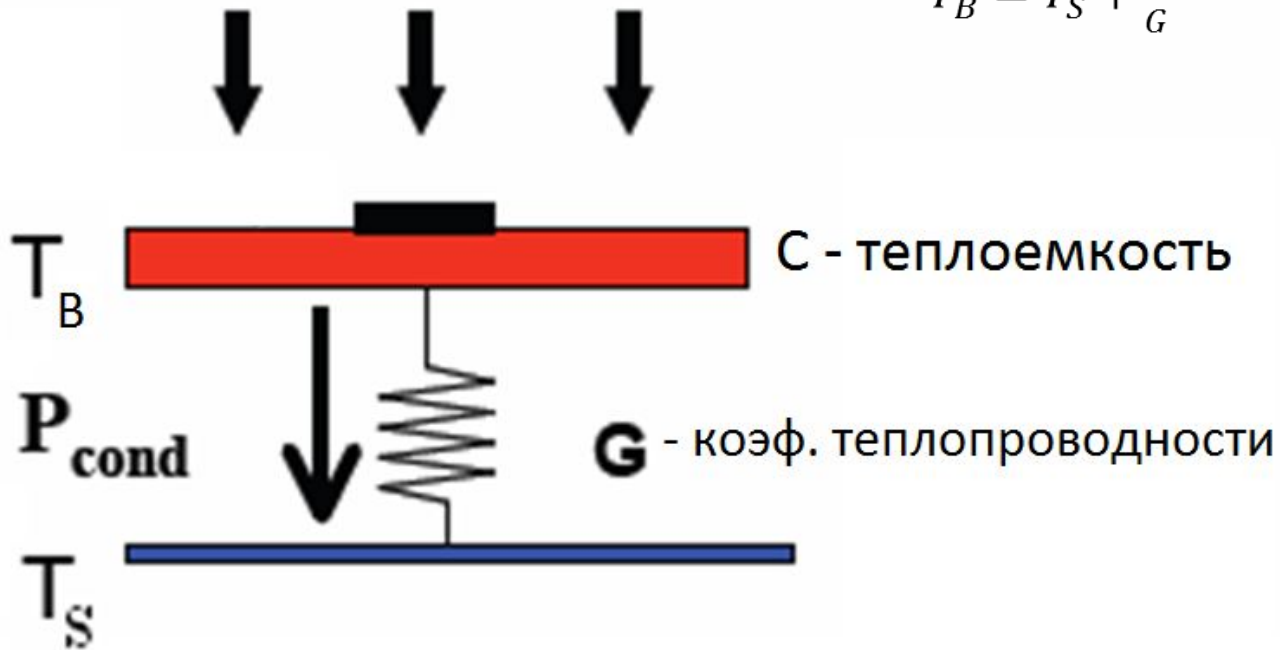
$$P_{\text{ПР}} = \frac{\varepsilon^2 \cdot R_{\text{ПР}} / 2}{(R_{\text{ПР}} + R_A)^2 + (X_{\text{ПР}} + X_A)^2}$$

$$P_{\text{ПР}}^{\text{max}} = \frac{\varepsilon}{8R_{\text{ПР}}}$$

$$P_{\text{ПР}} = P_{\text{ПР}}^{\text{max}} \cdot \frac{4R_A R_{\text{ПР}}}{(R_{\text{ПР}} + R_A)^2 + (X_{\text{ПР}} + X_A)^2}$$

Физика болометров

$$T_B = T_S + \frac{P}{G}$$



Расчет чувствительности

$$T_B = T_S + \frac{P}{G} \quad - \text{падающая мощность модулируется с частотой } \omega$$

$$T_B = T_S + \frac{P}{G} \quad R - \text{сопротивление резистивного термометра}$$

Тогда выделяемая мощность $T_B = T_S + \frac{P}{G}$

Исходящий тепловой поток $T_B = T_S + \frac{P}{G}$

$$\tilde{G} = \frac{(A/l)}{(T_S - T_0)} \int_{T_0}^{T_S} \kappa(T) dT \quad [\text{W/K}] \quad \kappa(T) - \text{удельная теплопроводность}$$

Уравнение теплового баланса

Поток входной мощности равен потоку выходной и сумме выходной и накапливаемой в абсорбере с теплоемкостью C

$$T_B = T_S + \frac{P}{G}$$

$$T_B = T_S + \frac{P}{G} \quad \text{- динамическая теплопроводность}$$

стационарная часть $T_B = T_S + \frac{P}{G}$

зависящая от времени $T_B = T_S + \frac{P}{G}$

Чувствительность по напряжению

$$T_B = T_S + \frac{P}{G}$$

Подставляя нестационарную часть уравнения теплового баланса получаем:

$$T_B = T_S + \frac{P}{G} \quad [\text{В/Вт}]$$

Поскольку R зависит от T , то для учета приращения напряжения V_1 используют эффективную теплопроводность

$$T_B = T_S + \frac{P}{G}$$

где $T_B = T_S + \frac{P}{G}$ - коэффициент электротермической обратной СВЯЗИ

Электротермическая обратная СВЯЗЬ

- Полупроводники: $\alpha < 0$ $G_e > G$
- сверхпроводники: $\alpha > 0$ $G_e < G$

Чувствительность по
напряжению

$$T_B = T_S + \frac{P}{G} \quad T_B = T_S + \frac{P}{G}$$

Нужен разумный баланс между высокой чувствительностью и малой T_e

Мощность эквивалентная шуму

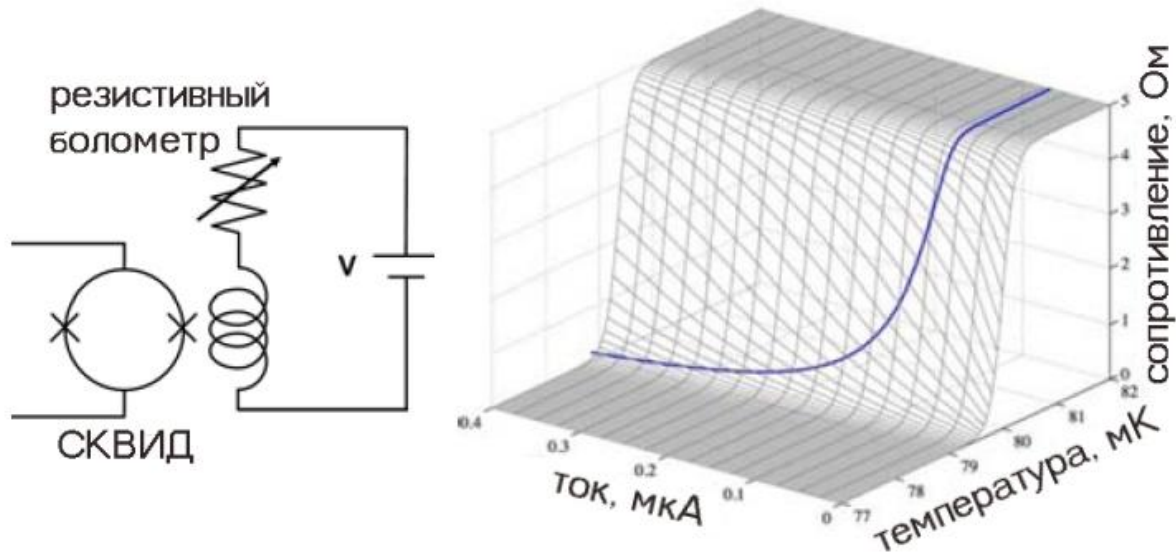
- Это оптическая мощность, приложенная к входу идеального (нешумящего) оптического приемника и создающая на выходе электрическую шумовую мощность, равную наблюдаемой на выходе фактически рассматриваемого приемника.
- Мощность сигнала на входе, при которой соотношение сигнал/шум на выходе равно 1, если времени интегрирования составляет 0.5 с

Собственная МЭШ болометра

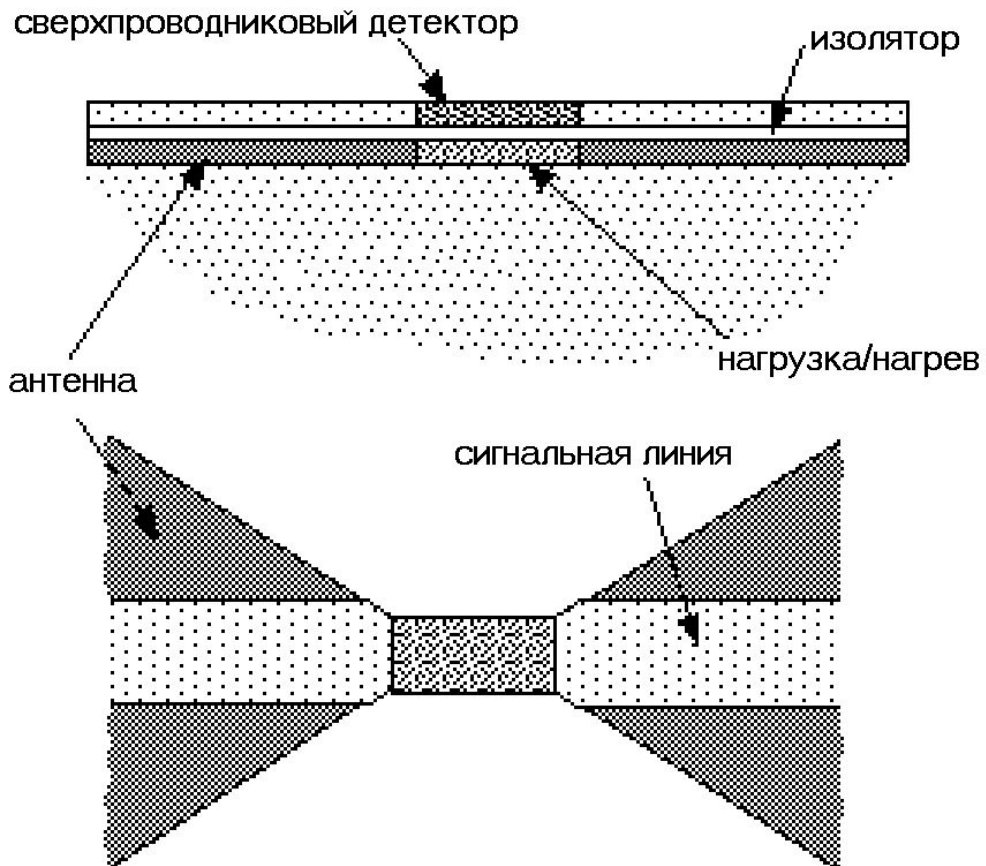
$$T_B = T_S + \frac{P}{G}$$

Тип болометра	Энергия квантования, мкэВ	Характерный параметр абсорбера, мК	NEP_{shot} , 10^{-19} Вт Гц $^{-1/2}$
БХЭ	$k_B T_e = 9$	$T_e = 50$	1
БСП	$\Delta = 73$	$T_c = 500$	4
БКИ [11, 12]	$\Delta = 200$	$T_c = 1200$ (Al)	7

Болометр на крае с/п перехода



Изменение электронной температуры БКП под действием излучения приводит к увеличению сопротивления пленки вблизи критической температуры T_c . Ток через болометр, работающий в режиме задания напряжения, считывается посредством СКВИДа.



$$\Delta T < 10^{-5} \text{ K}$$

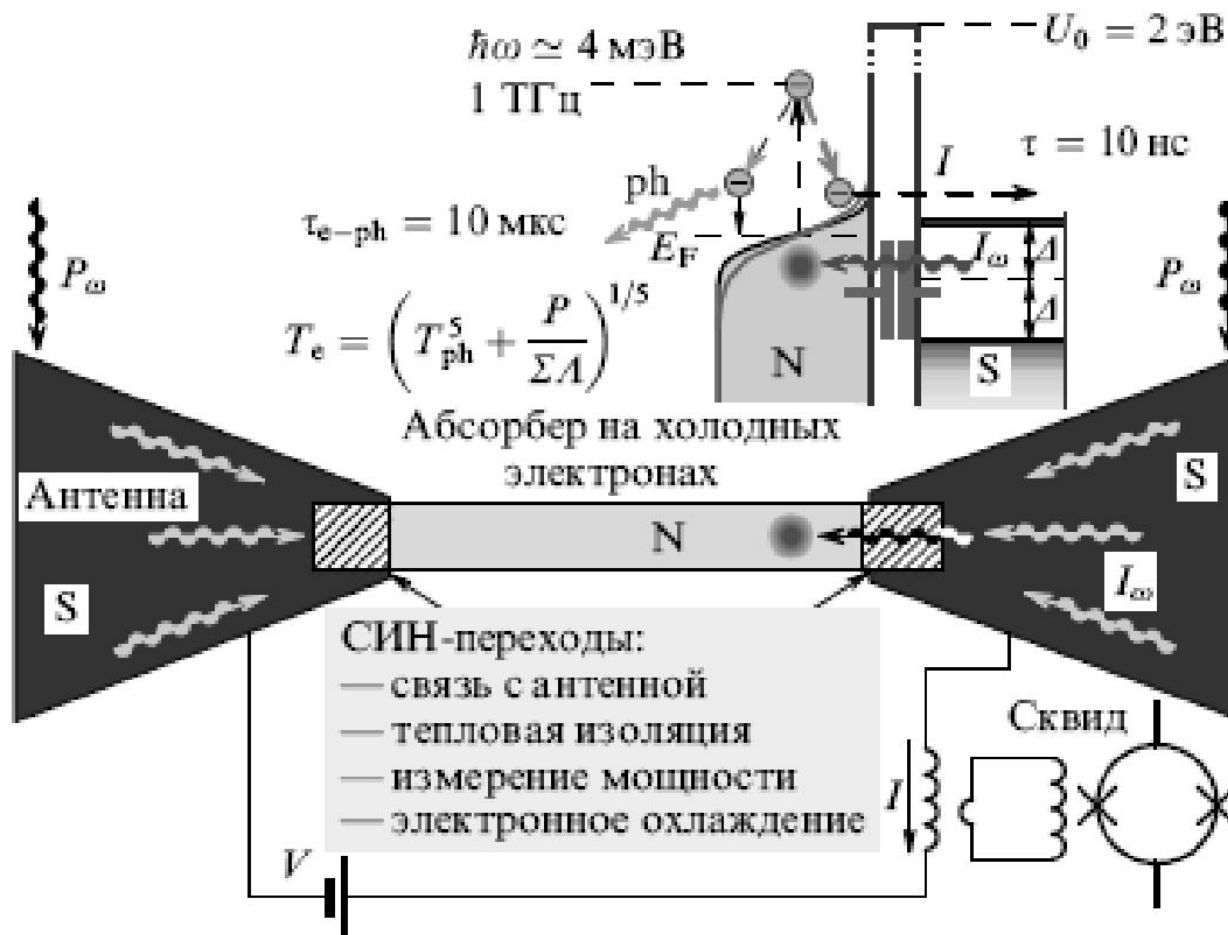
$$NEP \sim 10^{-15} \text{ W/Hz}^{0.5}$$

Минимальная NEP ~
 $10^{-15} \text{ W/Hz}^{0.5}$

При $T_c = 500 \text{ mK}$

$$NEP = \sqrt{4k T^2 G}$$

Болометр на холодных электронах



Уравнение теплового баланса БХЭ

$$P_{\text{cool}}(V, T_e, T_{\text{ph}}) + \Sigma \Lambda (T_e^5 - T_{\text{ph}}^5) + C_A \frac{dT}{dt} = P_0 + \delta P(t)$$

Λ — объем абсорбера $C_A = \gamma T_e$ — удельная теплоемкость

$$G_{\text{eff}} = G_{\text{cool}} + G_{\text{e-ph}} + i\omega C_A$$

$$S_i = \frac{\partial I}{\partial P} = \frac{\partial I / \partial T}{G_{\text{cool}} + G_{\text{e-ph}} + i\omega C_A} = \frac{\partial I / \partial T}{G_{\text{cool}}} \frac{L}{(L+1)[1+i\omega\tau]} \quad L = G_{\text{cool}} / G_{\text{e-ph}} \gg 1$$

$$\tau = \frac{C_A}{G_{\text{e-ph}} + G_{\text{cool}}} = \frac{\tau_0}{L+1} \quad \tau_0 = C_A / G_{\text{e-ph}}$$

Тип болометра	Энергия квантования, мкэВ	Характерный параметр абсорбера, мК	$NEP_{shot},$ $10^{-19} \text{ Вт Гц}^{-1/2}$
БХЭ	$k_B T_e = 9$	$T_e = 50$	1
БСП	$\Delta = 73$	$T_c = 500$	4
БКИ [11, 12]	$\Delta = 200$	$T_c = 1200 \text{ (Al)}$	7

Квантовая эффективность N и S абсорберов

