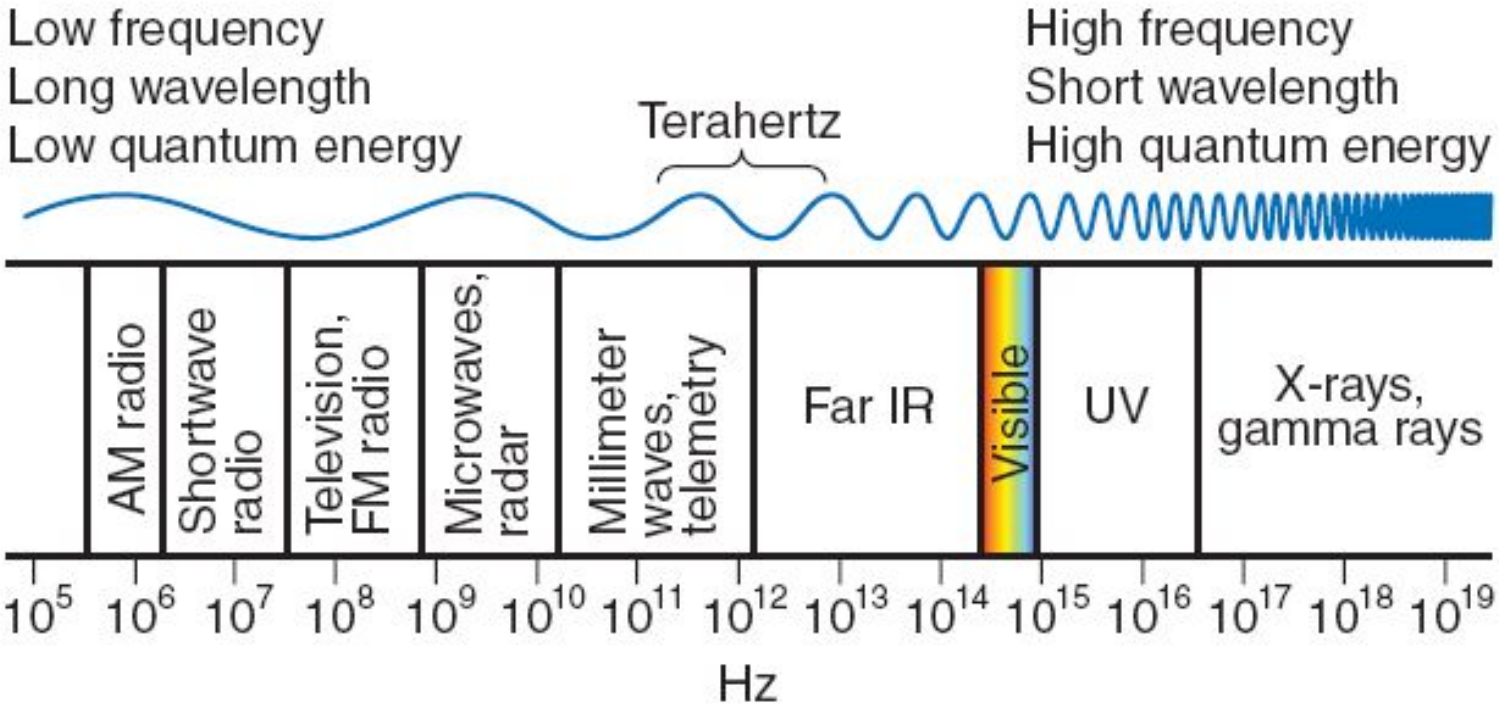
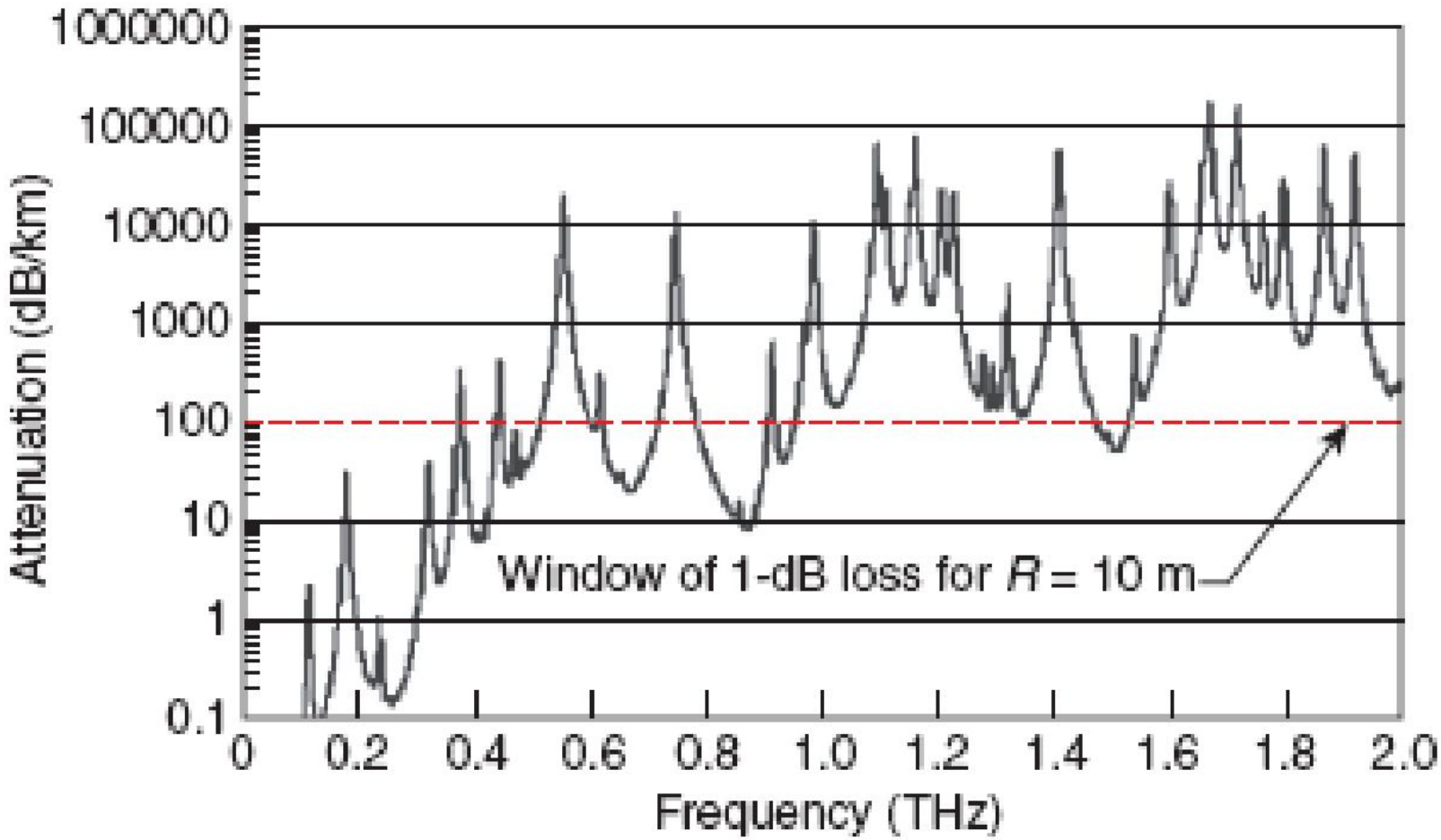
Криогенные детекторы терагерцового диапазона



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	

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

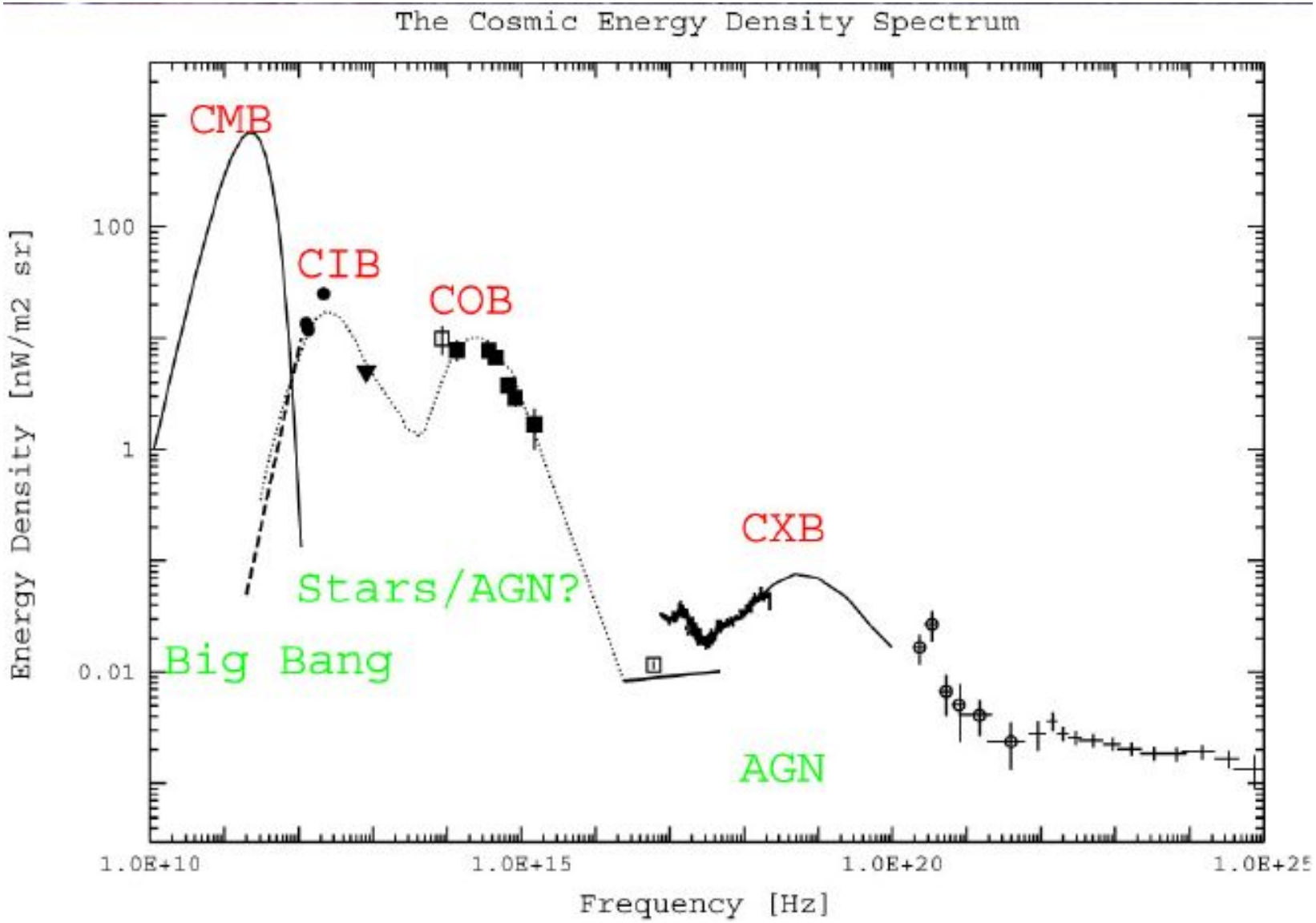
Затухание на уровне моря



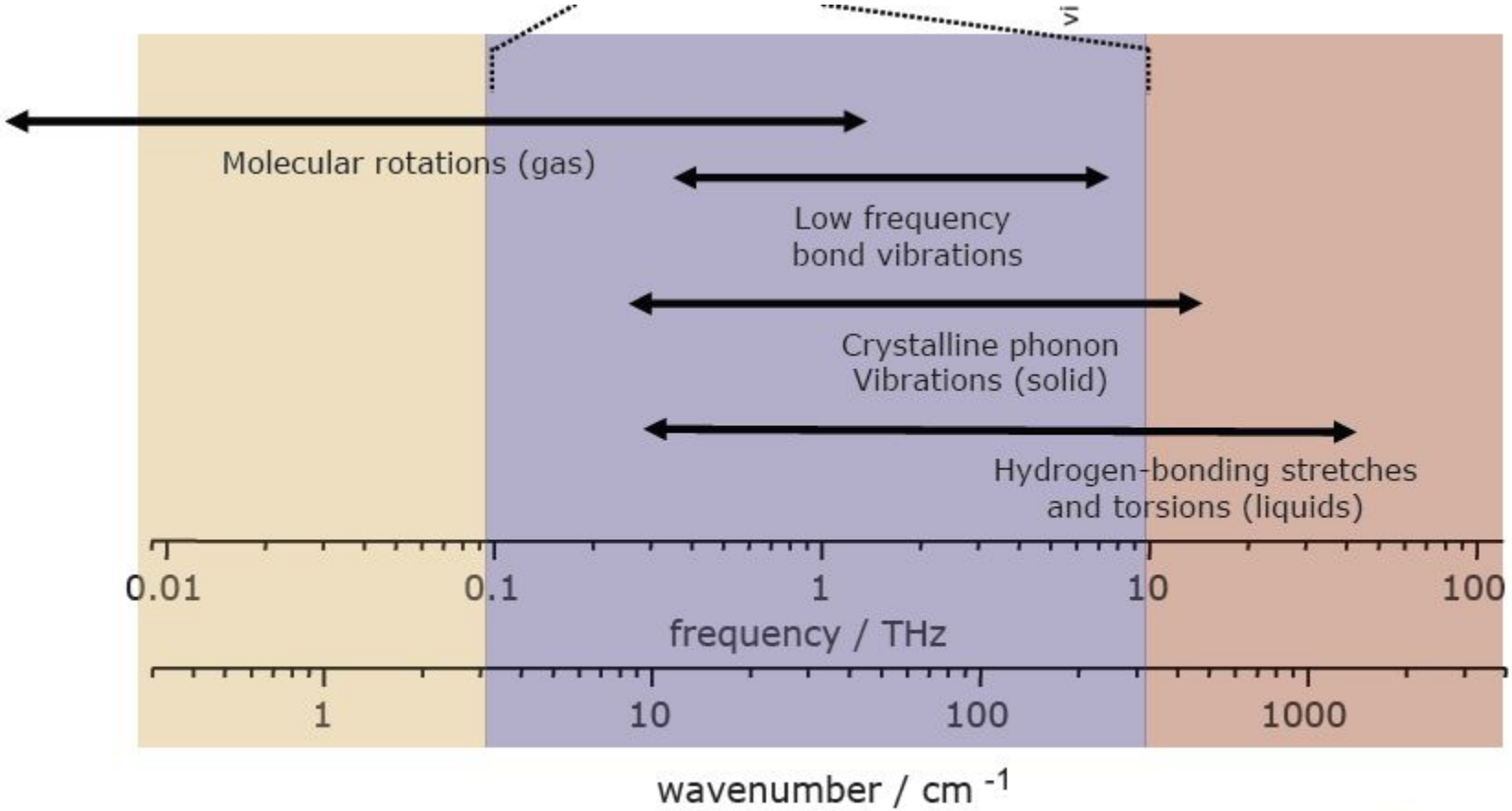
Два семейства методов

- 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



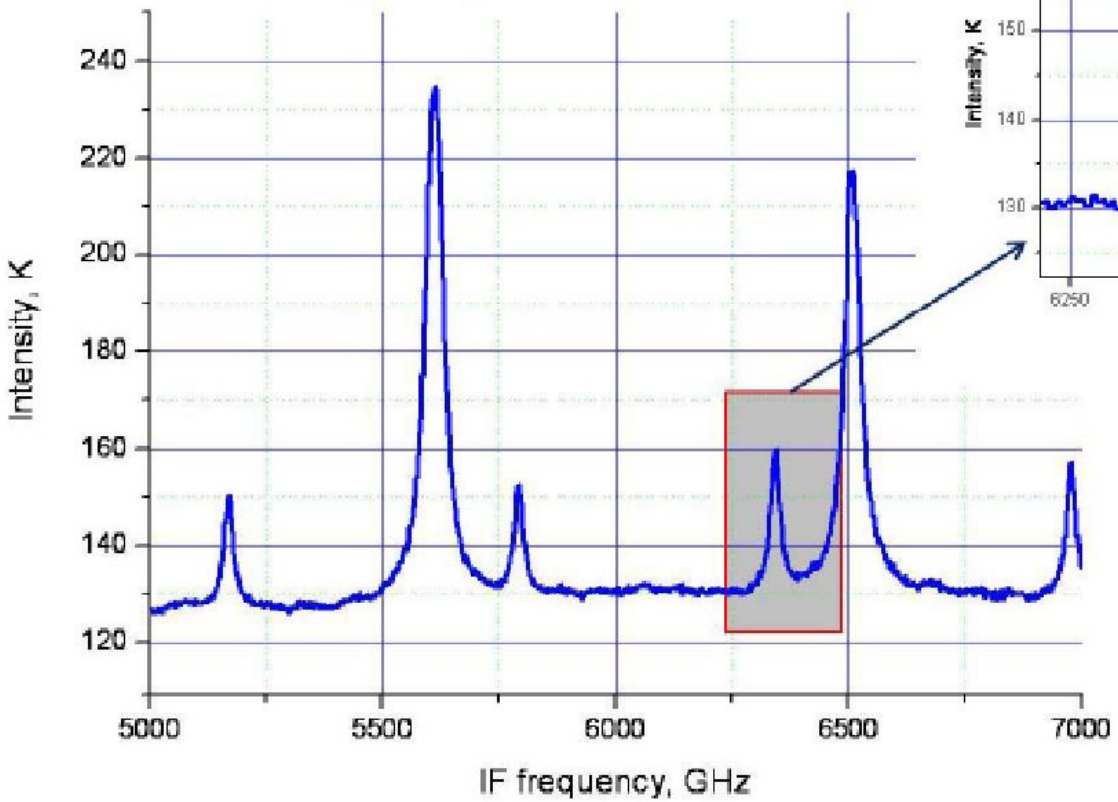
Спектроскопия

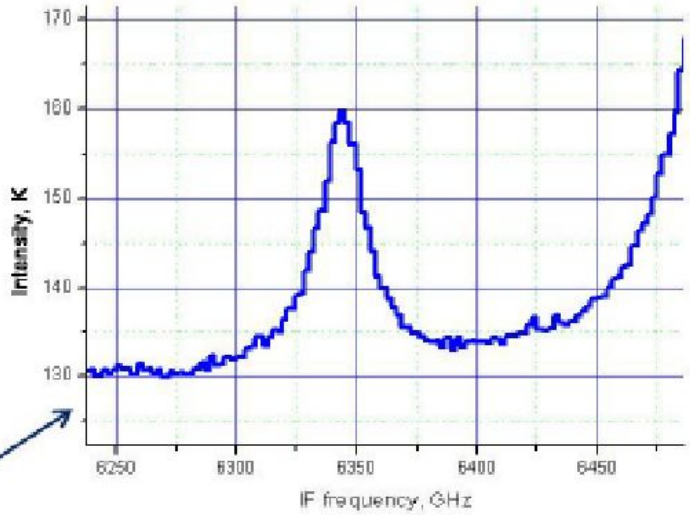


TeraView

Пример спектра, измеренного гетеродинным методом

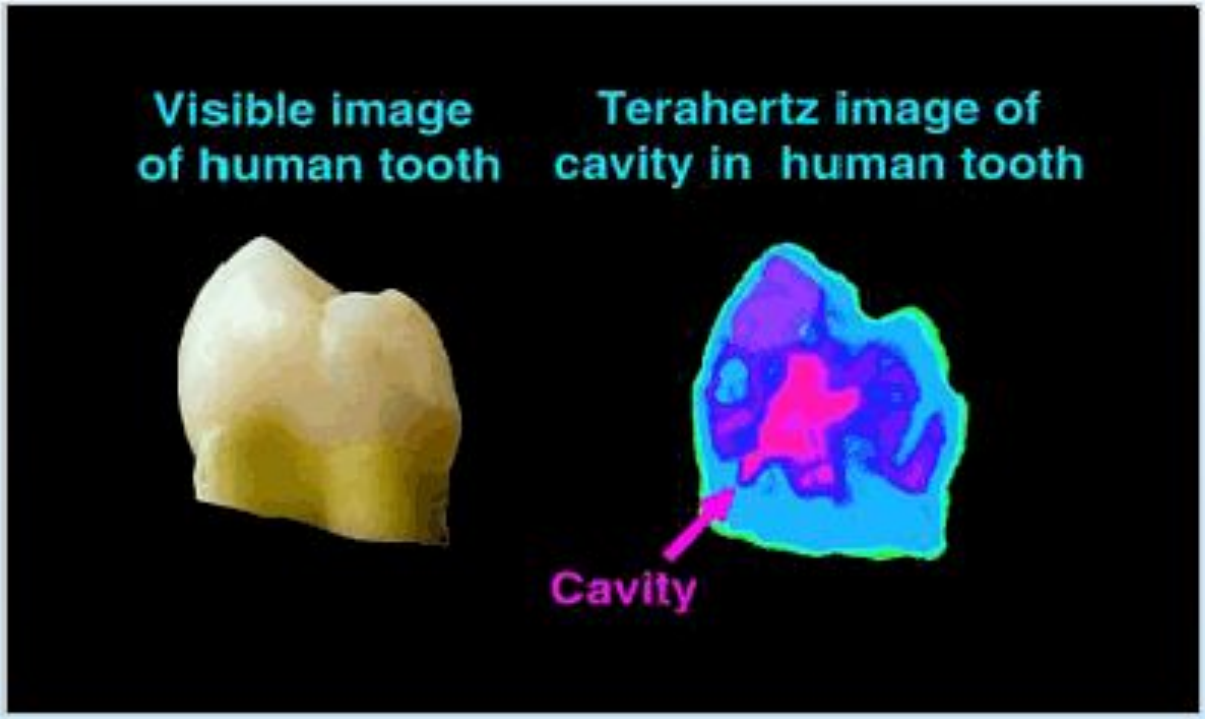
Deconvolved spectrum of the OCS emission lines at a gas pressure 2.6 mBar.
LO frequency 601 GHz.





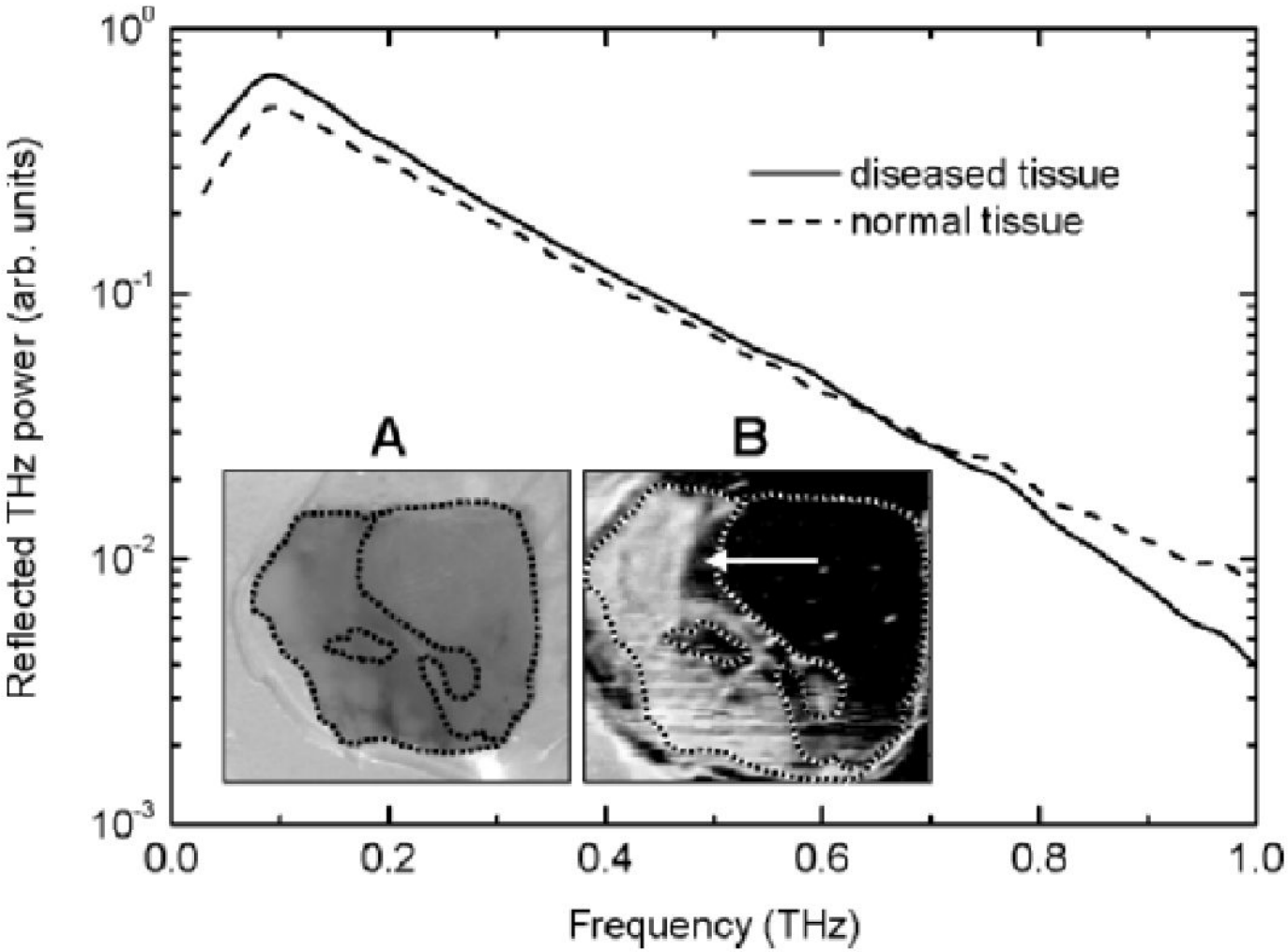
Two strong lines are saturated; weaker lines are not saturated isotopes.
The lines are detected, one in the LSB, the other one in the USB

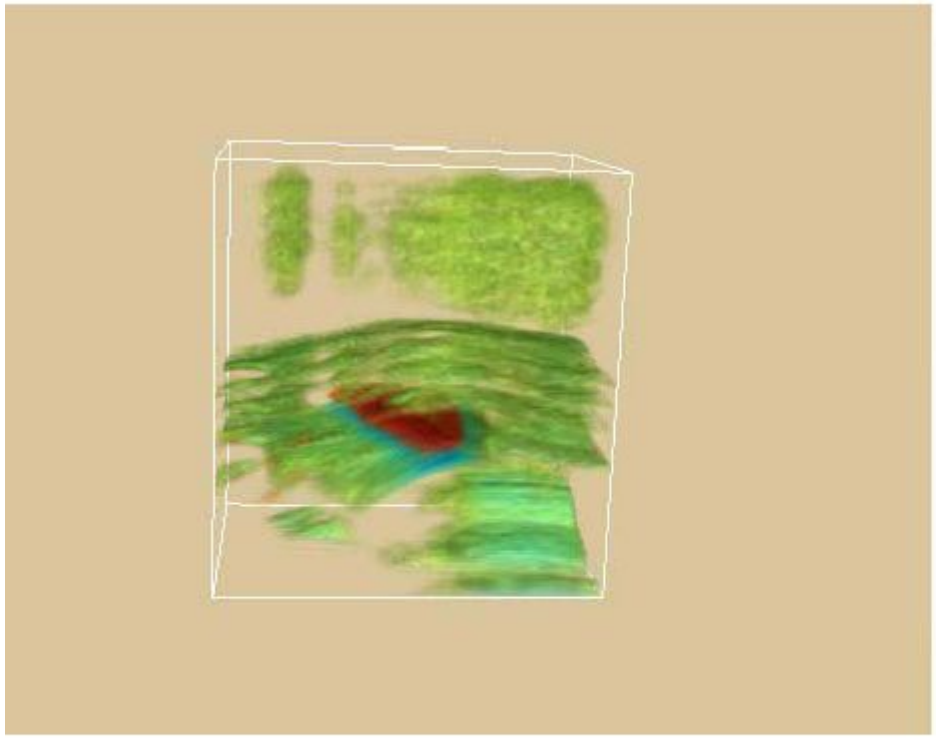
Медицинская диагностика

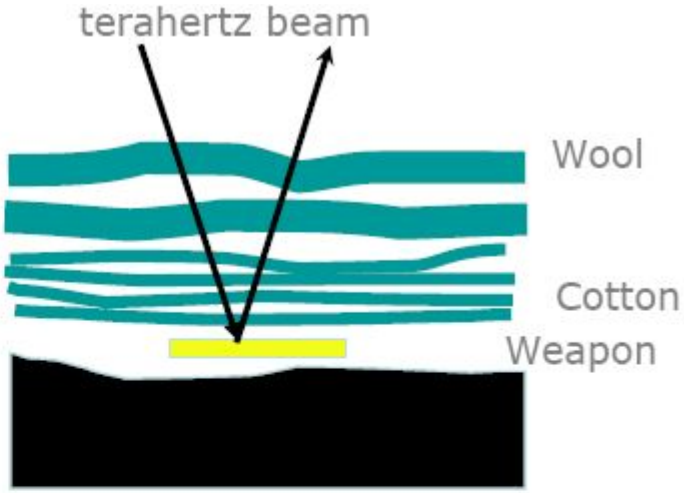


Crawley et al.
Caries Research
37(5):352-359
(2003)

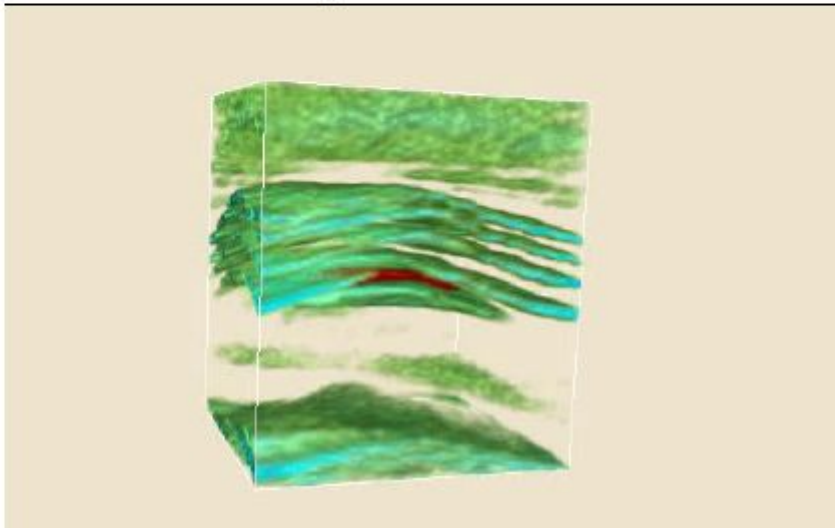
Базально-клеточная карцинома



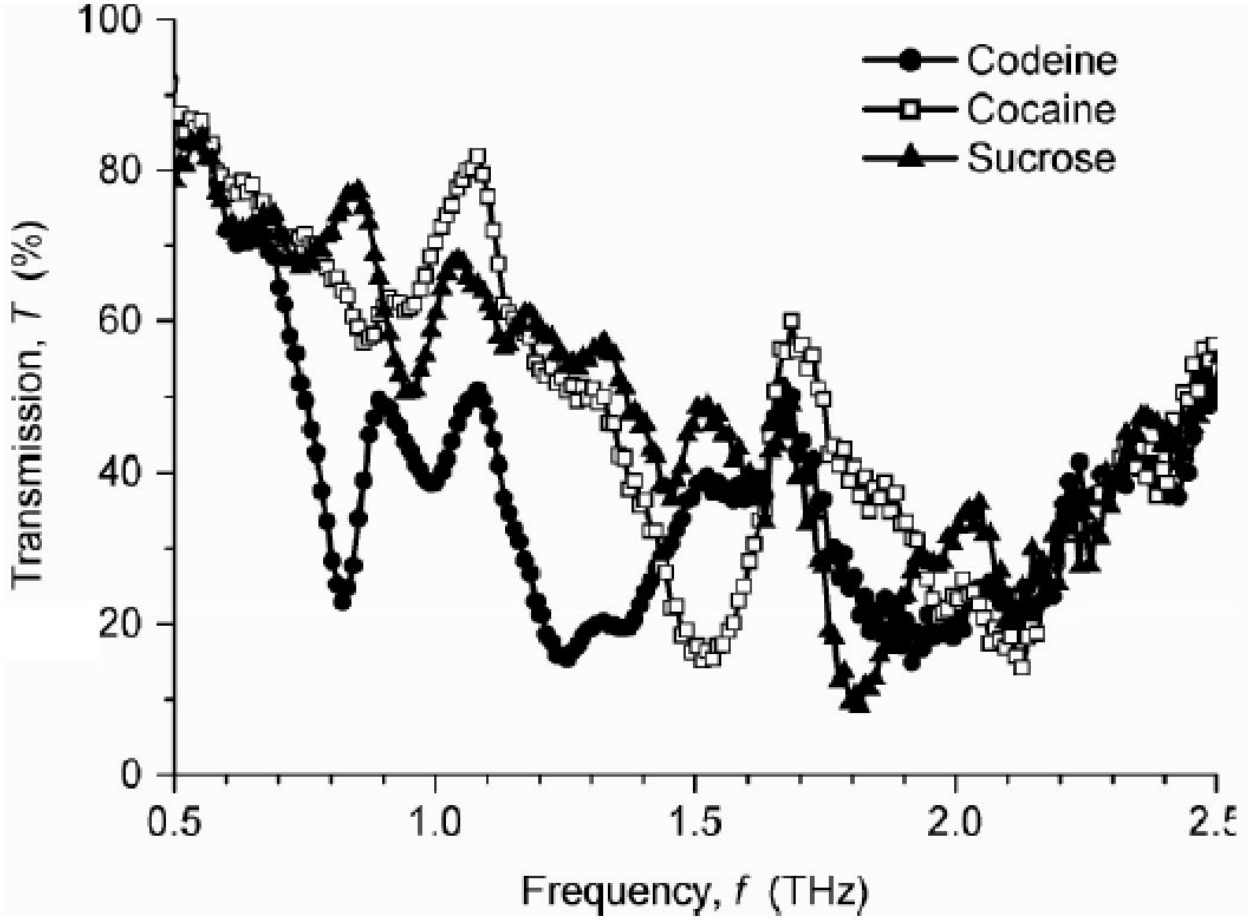




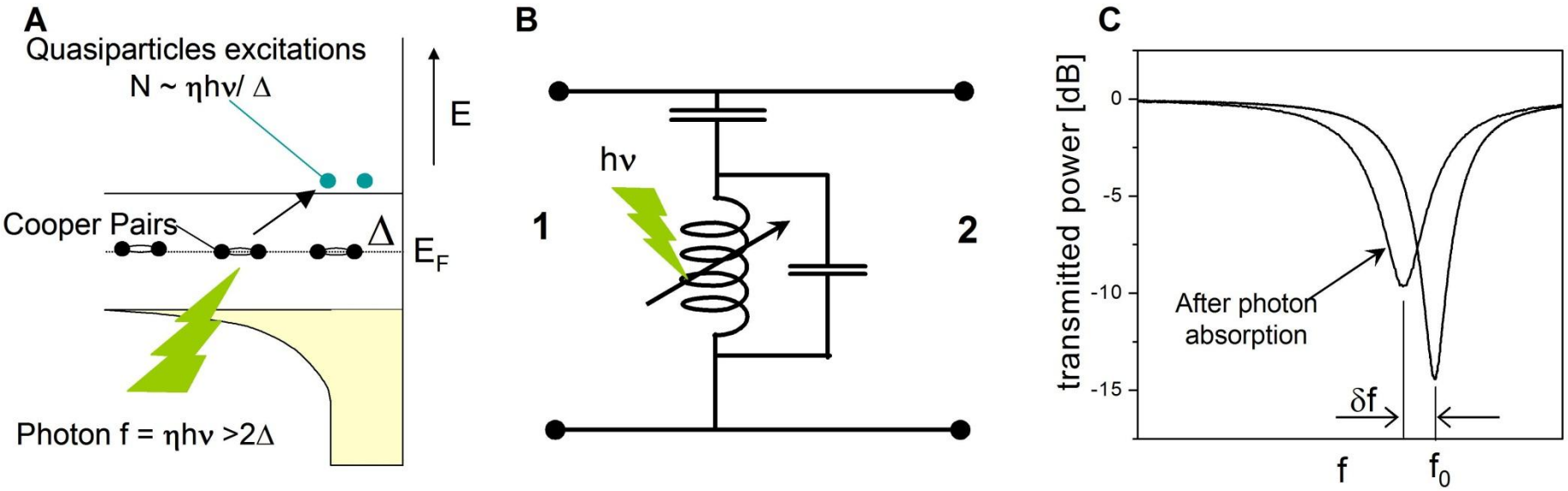
Subject's arm

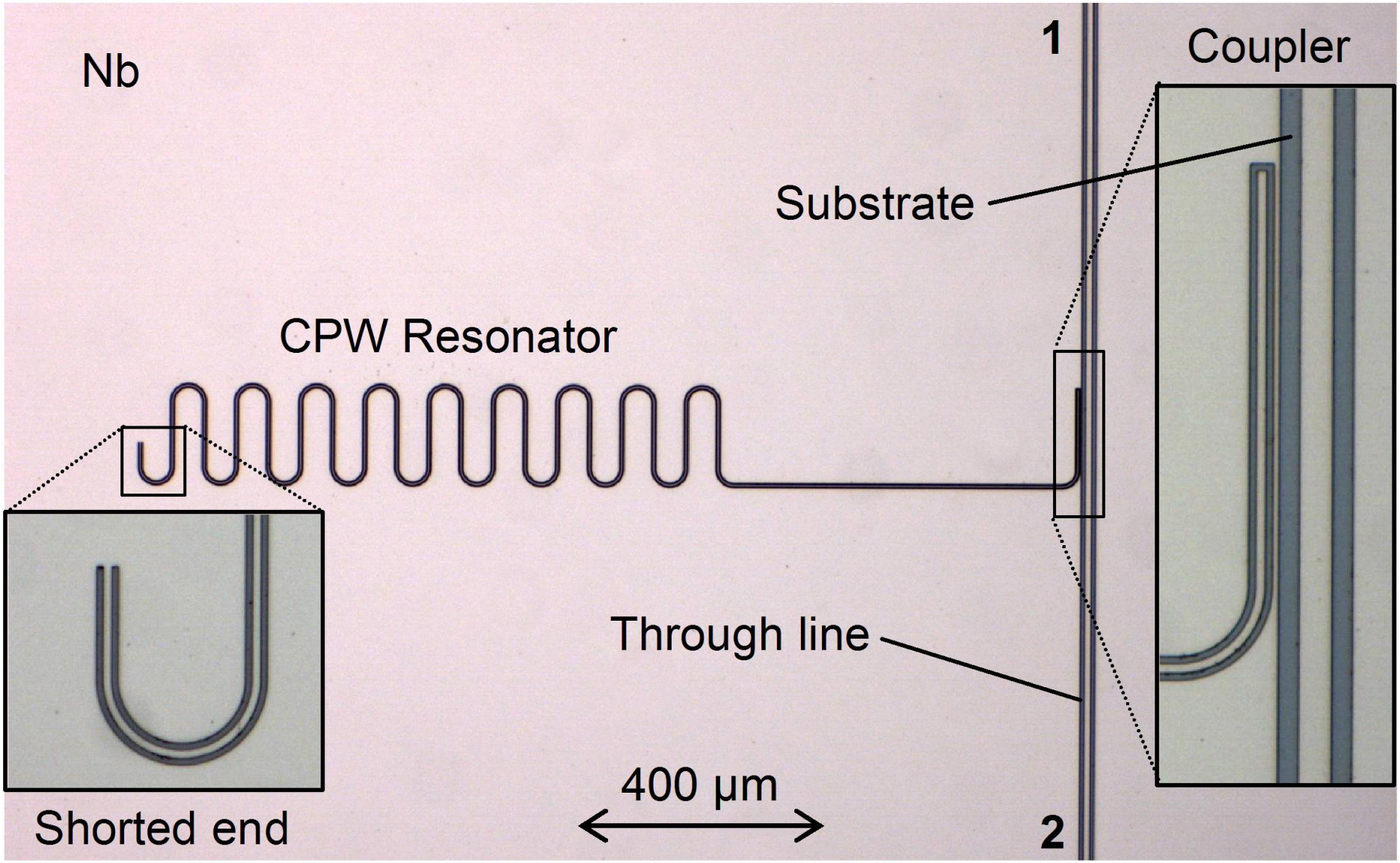


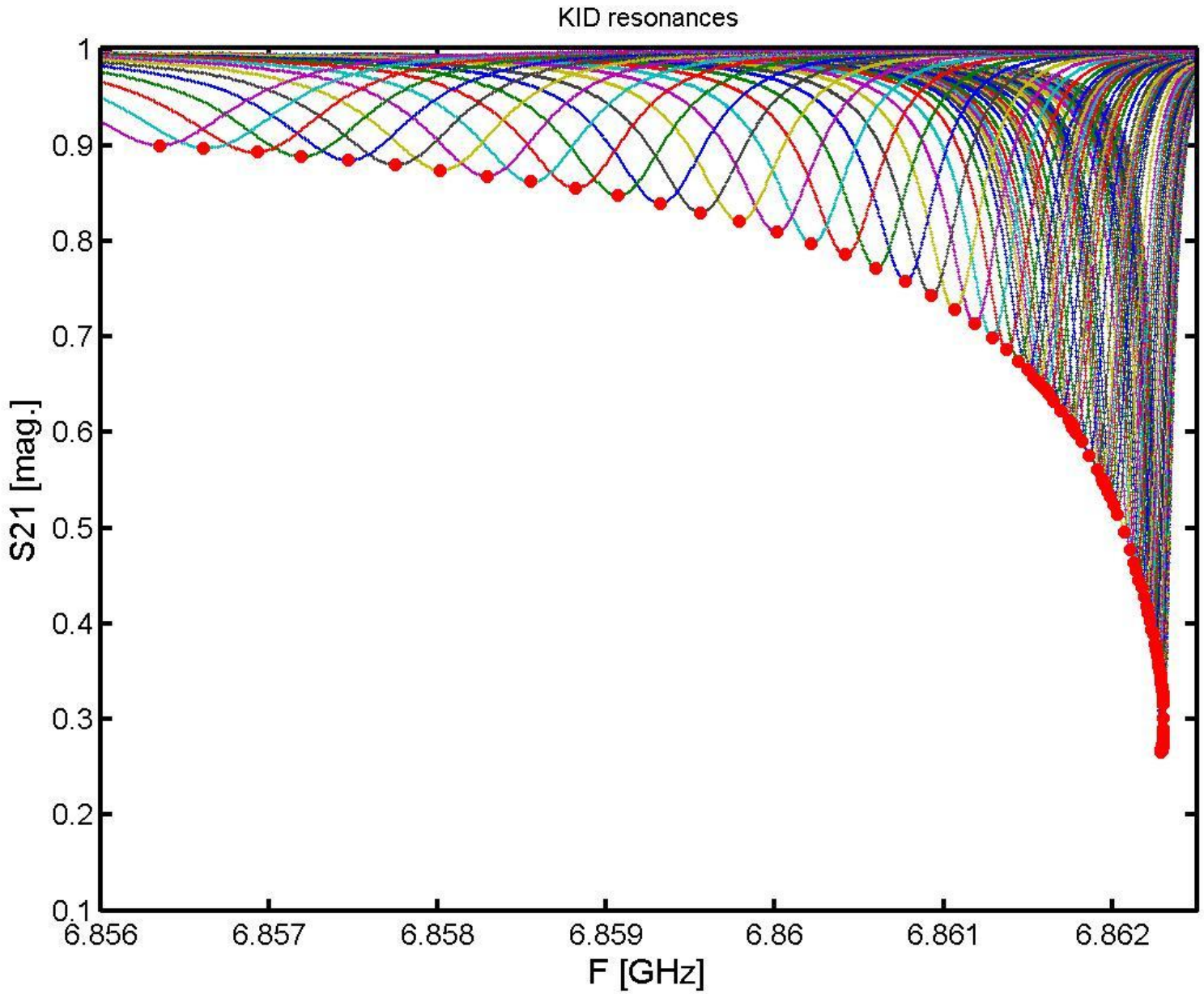
Детектирование наркотических веществ



Детекторы кинетической индуктивности

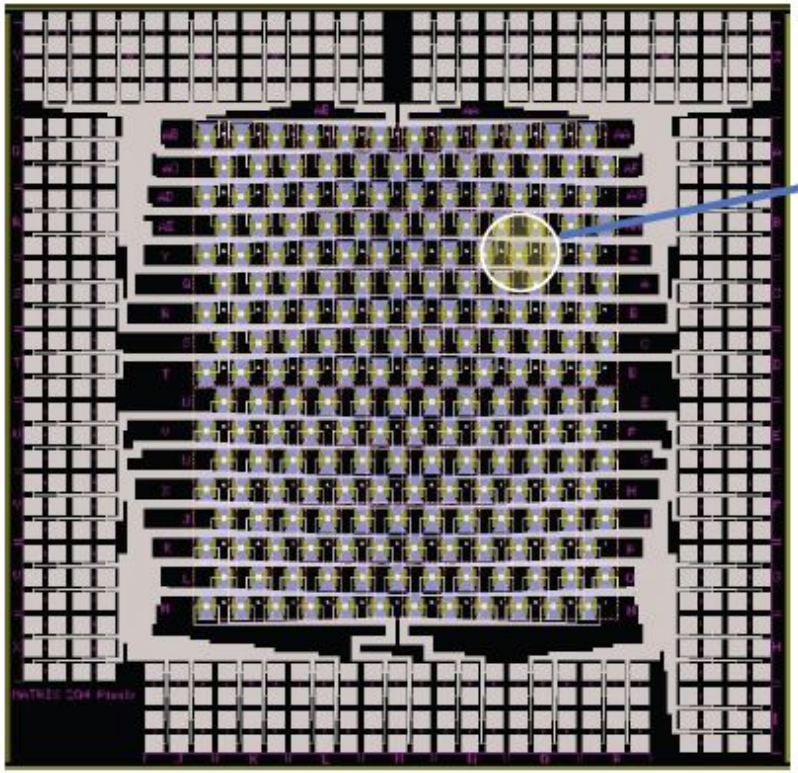


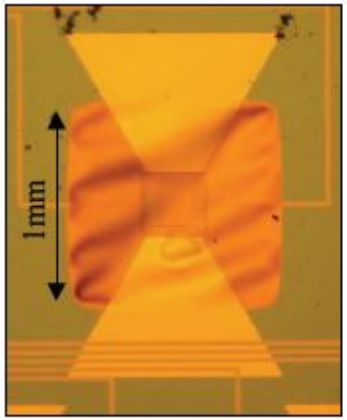

Nb
1
Coupler
Substrate
CPW Resonator
Through line
400 μm
Shorted end
2

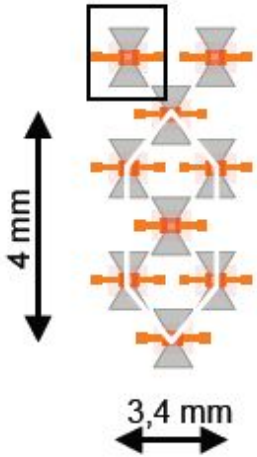

KID resonances
S21 [mag.]
F [GHz]
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
6.856
6.857
6.858
6.859
6.86
6.861
6.862

Детекторы с антенной

204 bolometers array with antennas

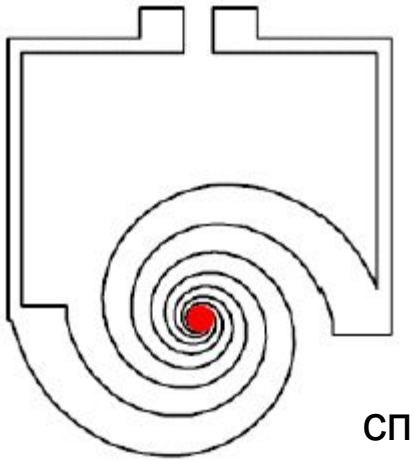




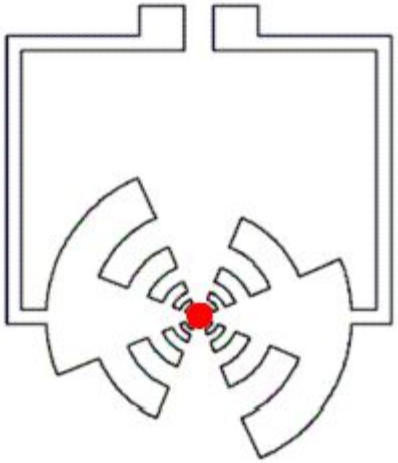


- Plannar antenna network for imaging in millimeter wavelength
- Versatile fabrication process for future applications :
  - Polarisation sensitive detectors
  - Integrated frequency selection on the pixels
- Thermal sensor can be **either high impedance or superconducting with NbSi**

Примеры широкополосных антенн

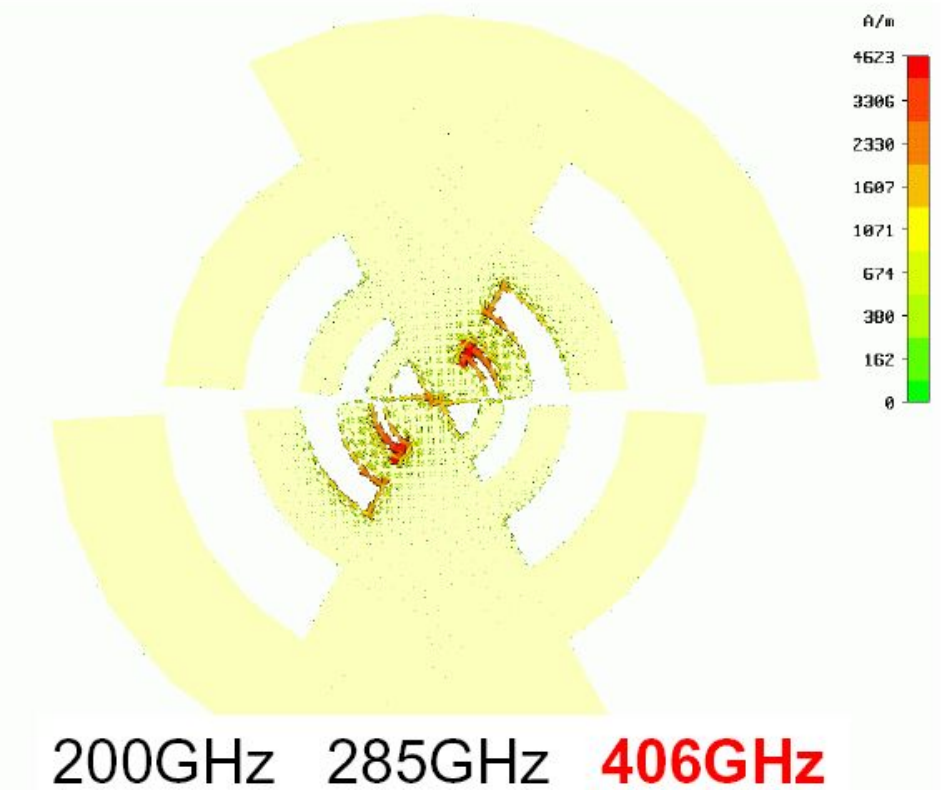


спиральная

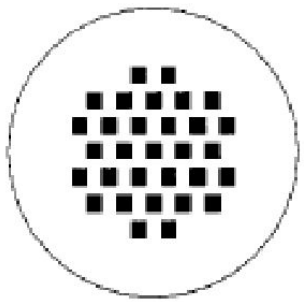


логопериодическая

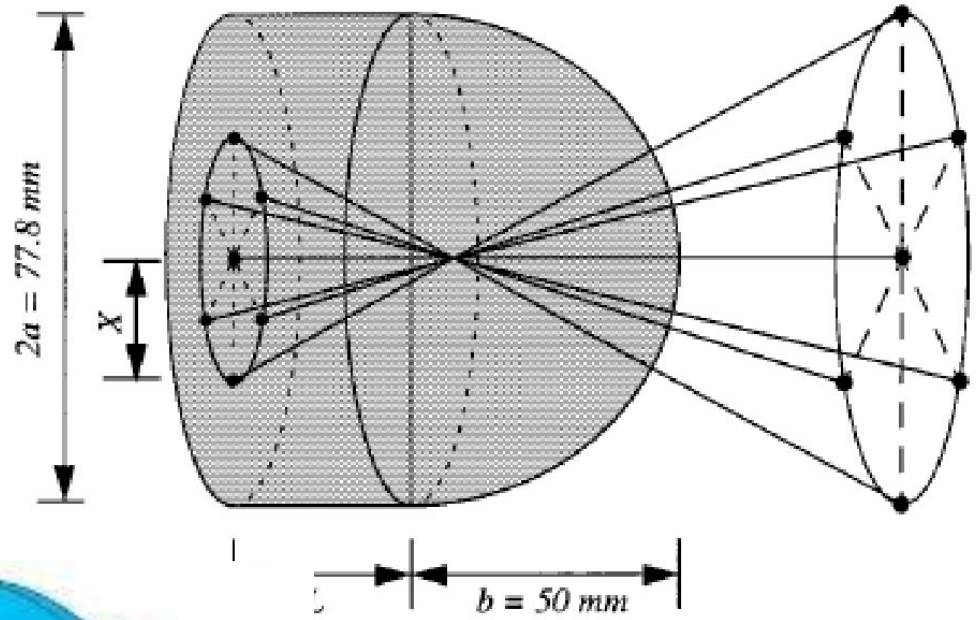
Поверхностные токи логопериодической антенны



Размещение чипа на квазиоптическкой линзе

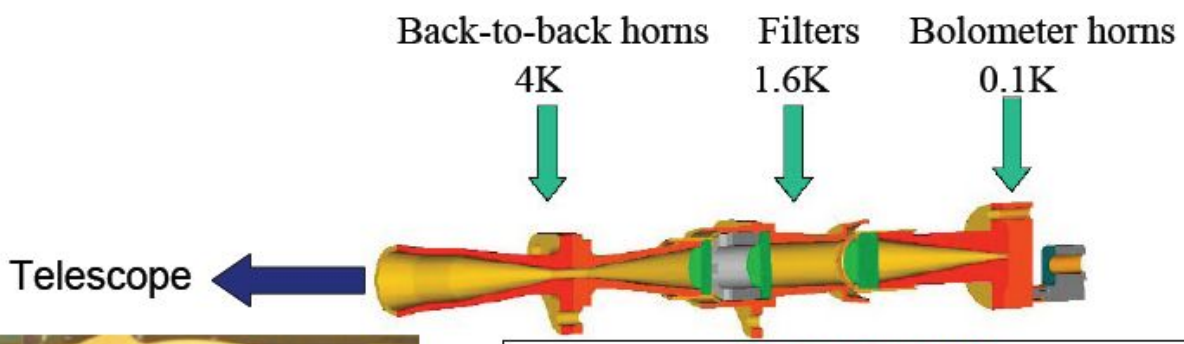


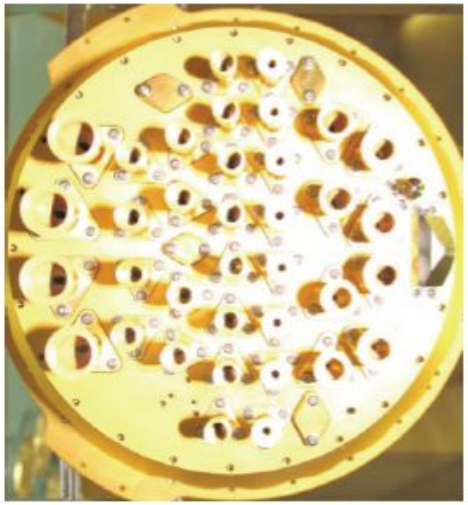
Array layout

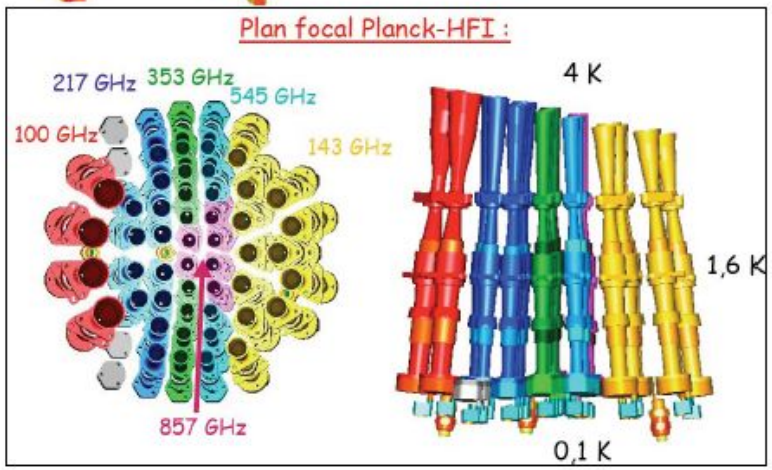


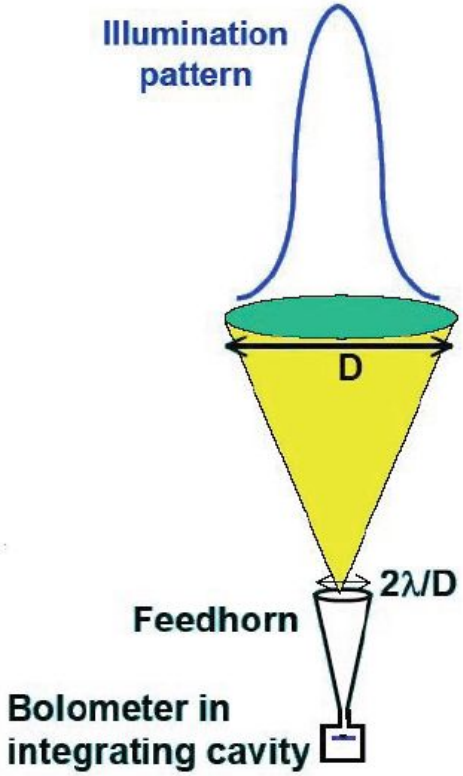
Волноводные конструкции

Example: Planck-HFI



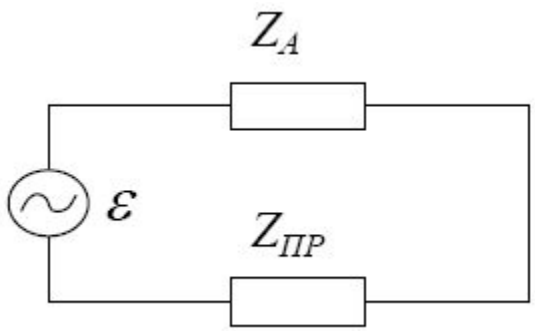






Недостаток - узкополосность

Согласование антенны с приемником



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

Импеданс антенны $Z_A = R_A + iX_A$

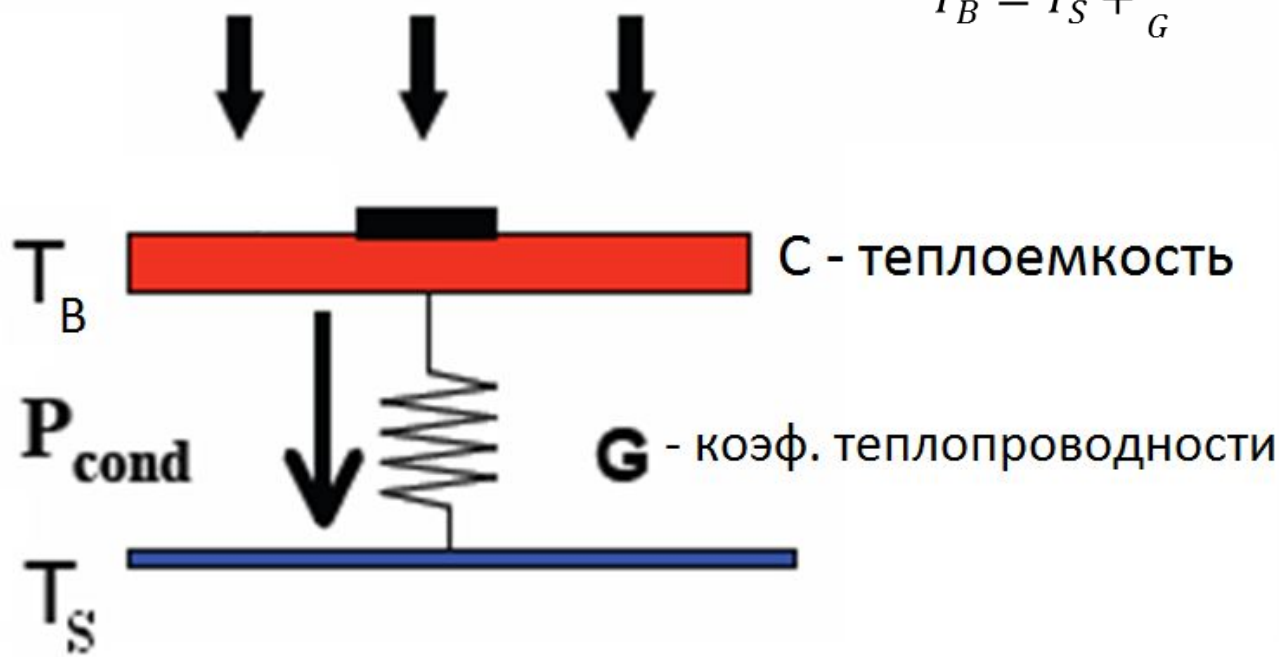
$$I = \frac{\varepsilon}{(Z_A + Z_{ПР})} \qquad P_{ПР} = \frac{1}{2} I^2 R_{ПР}$$

$$P_{ПР} = \frac{\varepsilon^2 \cdot R_{ПР}/2}{(R_{ПР} + R_A)^2 + (X_{ПР} + X_A)^2} \qquad P_{ПР}^{\max} = \frac{\varepsilon}{8R_{ПР}}$$

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

Физика болометров

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



Расчет чувствительности

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

$T_B = T_S + \frac{P}{G}$ R – сопротивление резистивного термометра

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

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

$$\bar{G} = \frac{(A/l)}{(T_S - T_0)} \int_{T_0}^{T_S} \kappa(T)\,dT \quad [\mathrm{W/K}]$$

k(T) – удельная теплопроводность

Уравнение теплового баланса

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

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

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

$$T_B = T_S + \frac{P}{G}$$ [В/Вт]

Поскольку R зависит от T, то для учета приращения напряжения V1 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

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

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

Нужен разумный баланс между высокой чувствительностью и малой τ_e

Мощность эквивалентная шуму

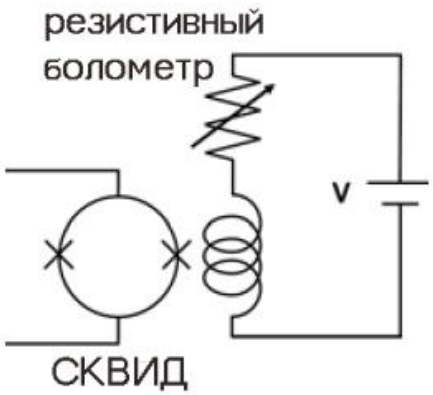
- Это оптическая мощность, приложенная к входу идеального (нешумящего) оптического приемника и создающая на выходе электрическую шумовую мощность, равную наблюдаемой на выходе фактически рассматриваемого приемника.
- Мощность сигнала на входе, при которой соотношение сигнал/шум на выходе равно 1, если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

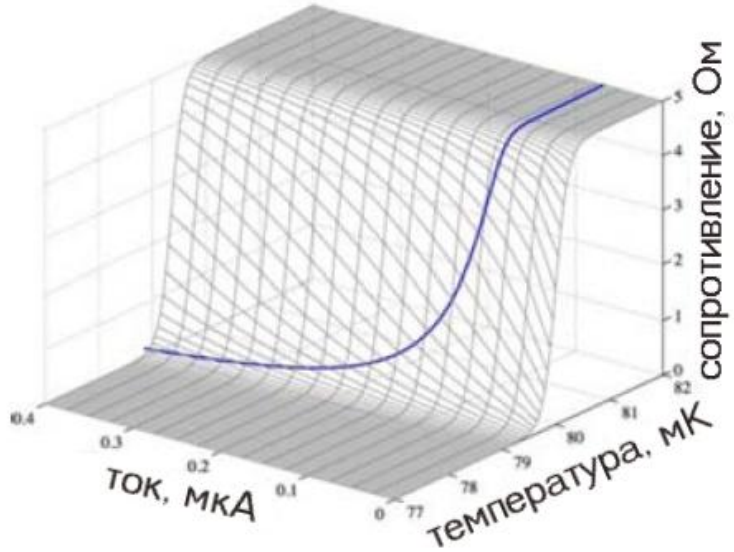
Собственная МЭШ болометра

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

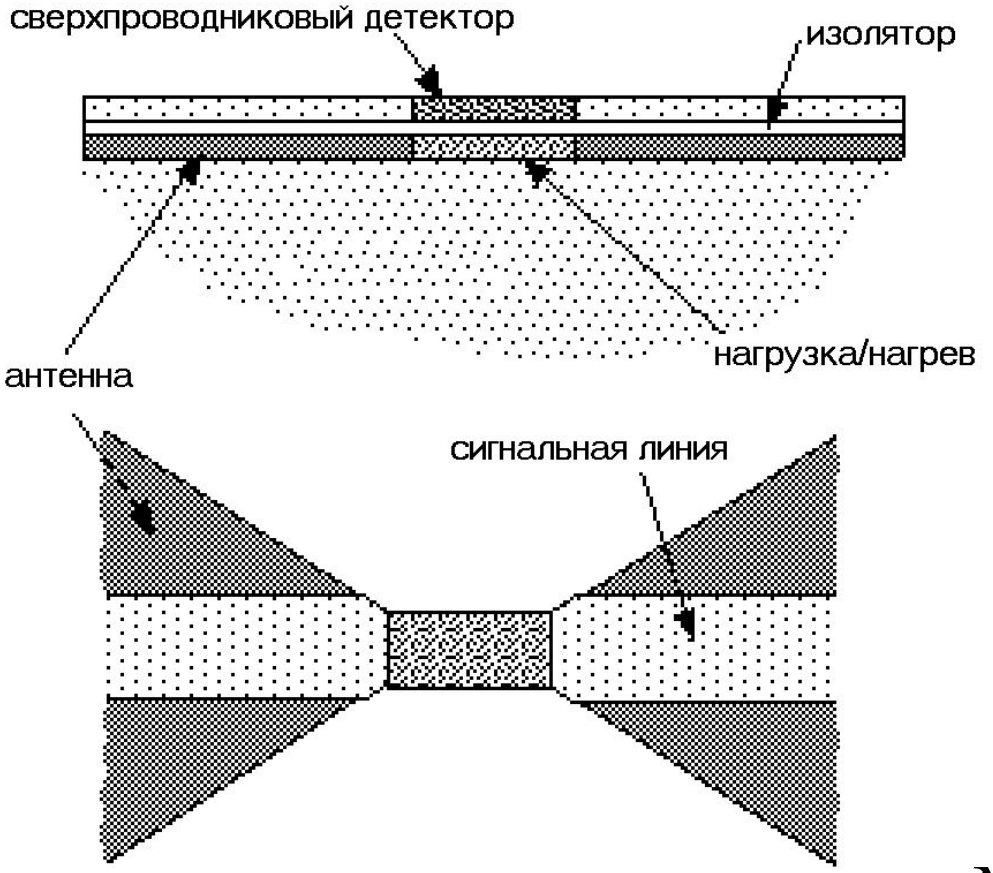
Тип болометра	Энергия квантования, мкэВ	Характерный параметр абсорбера, мК	NEP_{shot}, 10^{-19} Вт Гц$^{-1/2}$
БХЭ	$k_B T_e = 9$	$T_e = 50$	1
БСП	$\Delta = 73$	$T_c = 500$	4
БКИ [11, 12]	$\Delta = 200$	$T_c = 1200$ (Al)	7

Болометр на крае с/п перехода





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



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

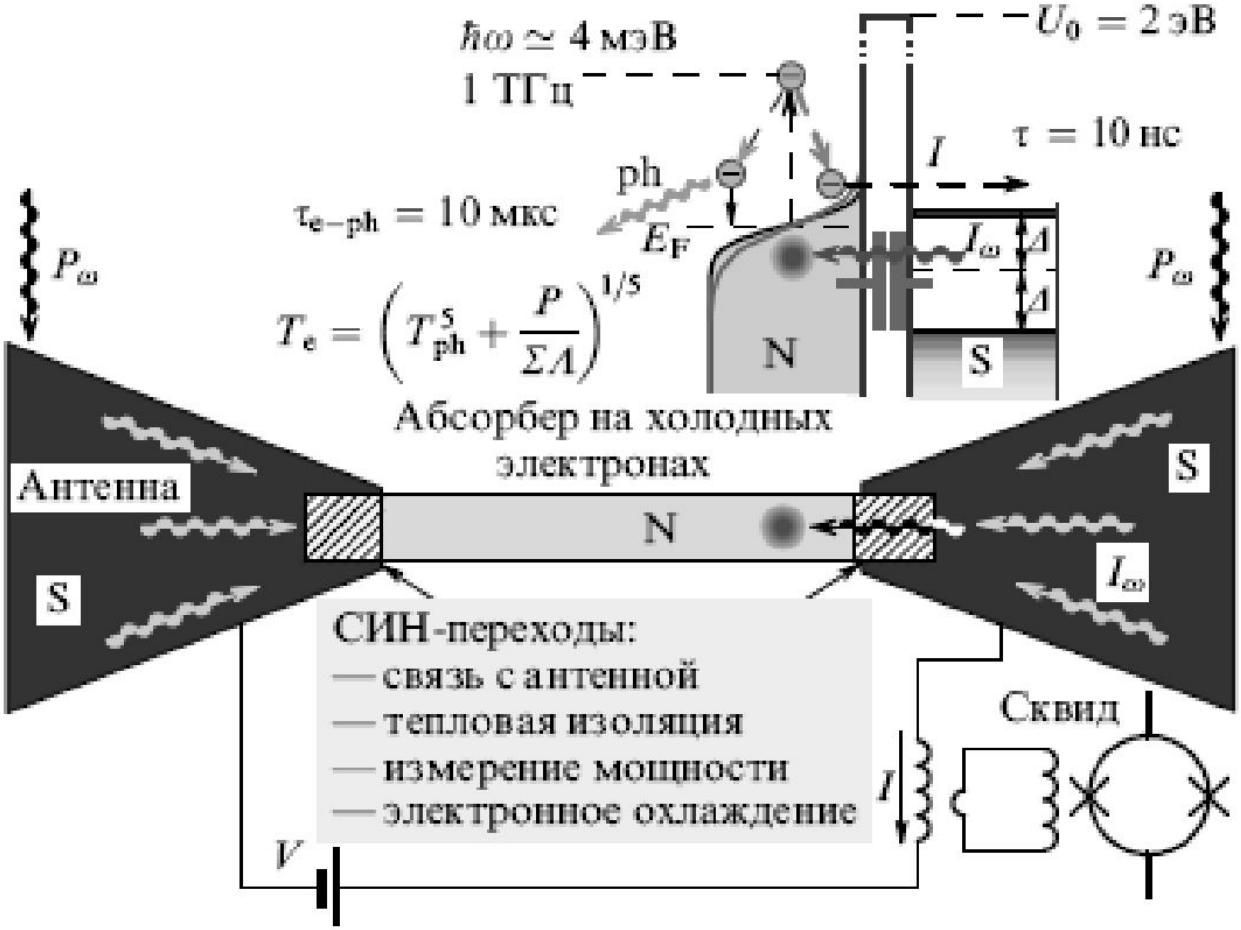
NEP~10^{-15} W/Hz$^{0.5}$

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

При T_c=500 mK

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

Болометр на холодных электронах



Уравнение теплового баланса БХЭ

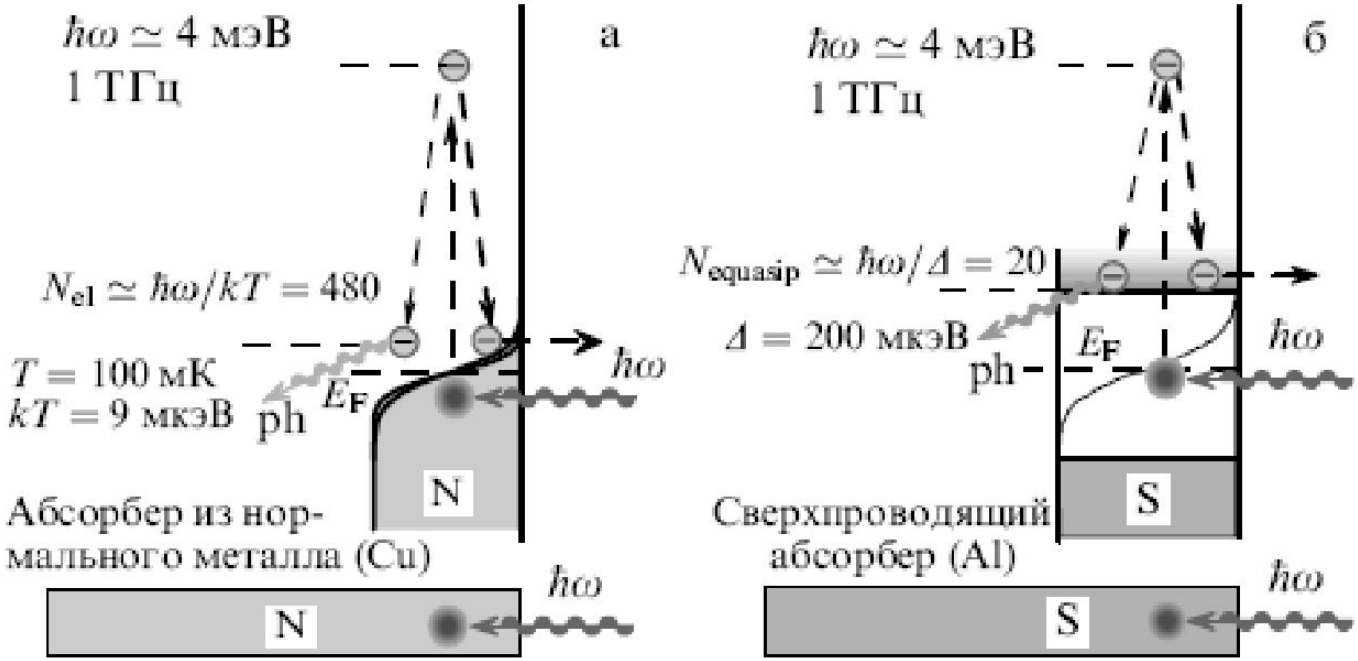
$$P_{\mathrm{cool}}(V, T_{\mathrm{e}}, T_{\mathrm{ph}}) + \Sigma\Lambda(T_{\mathrm{e}}^5 - T_{\mathrm{ph}}^5) + C_\Lambda \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} = P_0 + \delta P(t)$$

Λ — объем абсорбера $\quad C_\Lambda = \gamma T_{\mathrm{e}}$ — удельная теплоемкость

$$G_{\mathrm{eff}} = G_{\mathrm{cool}} + G_{\mathrm{e-ph}} + \mathrm{i}\omega C_\Lambda$$

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

$$\tau = \frac{C_\Lambda}{G_{\mathrm{e-ph}} + G_{\mathrm{cool}}} = \frac{\tau_0}{L+1} \qquad \tau_0 = C_\Lambda/G_{\mathrm{e-ph}}$$

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

Квантовая эффективность N и S абсорберов