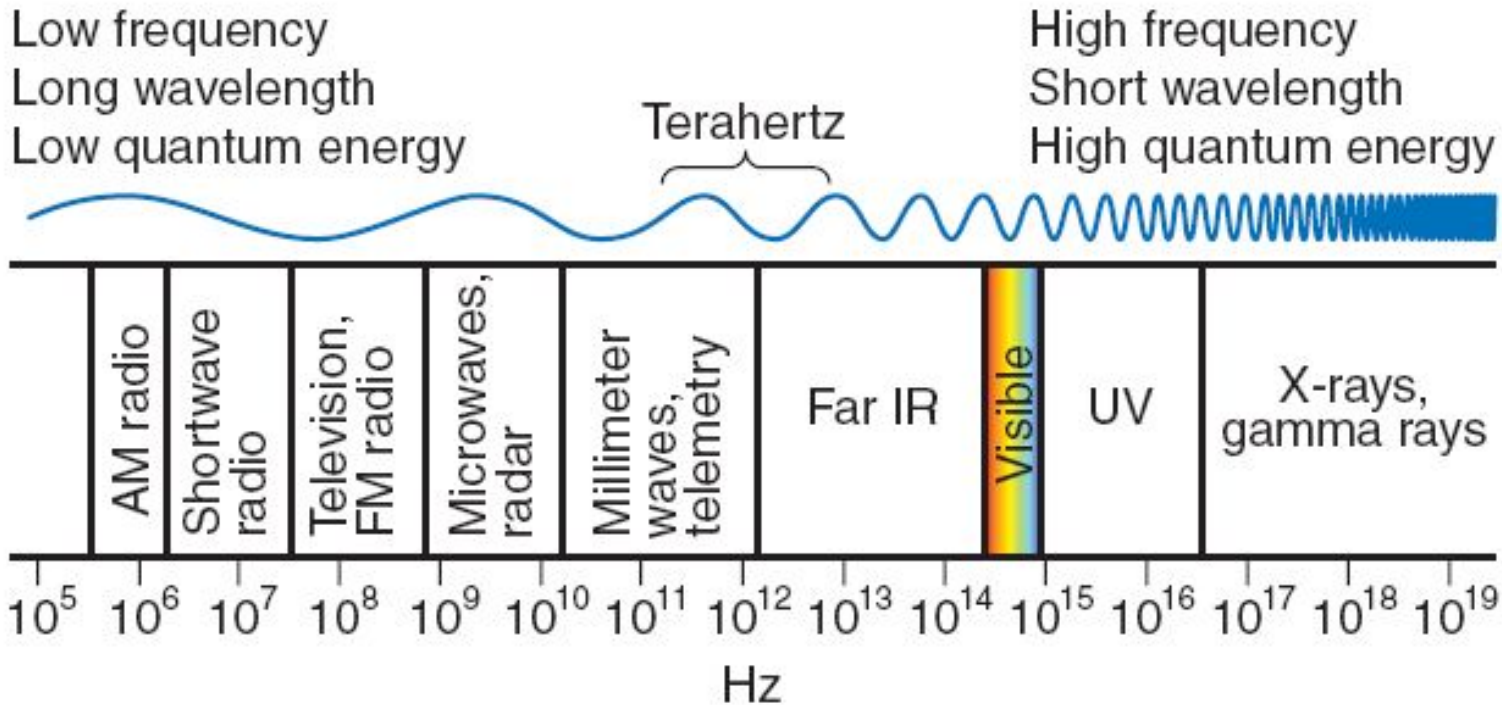


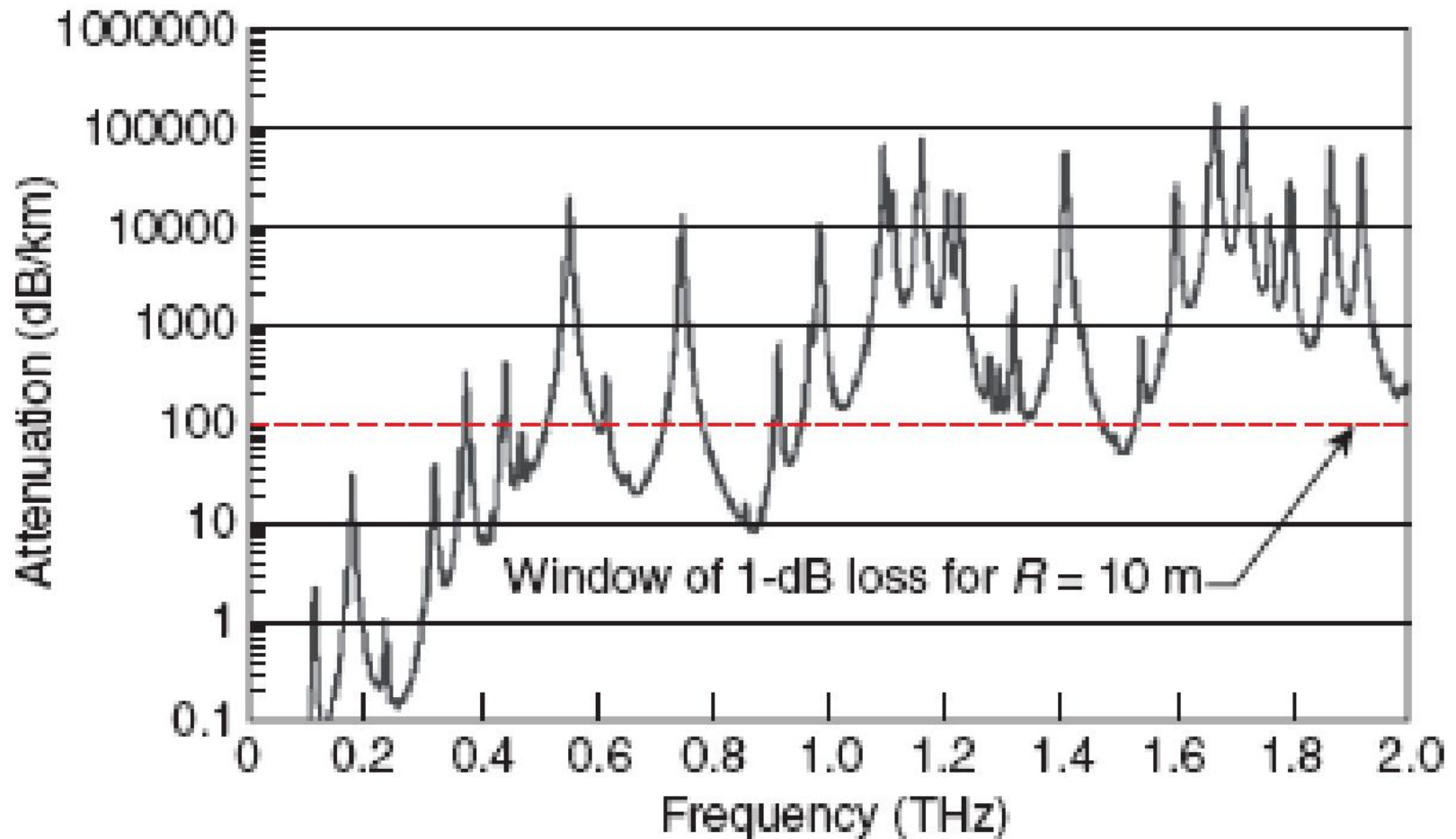
# Криогенные детекторы терагерцового диапазона



| Frequency (THz) | Wavenumber (cm <sup>-1</sup> ) | 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 <sub>2</sub> ) | 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

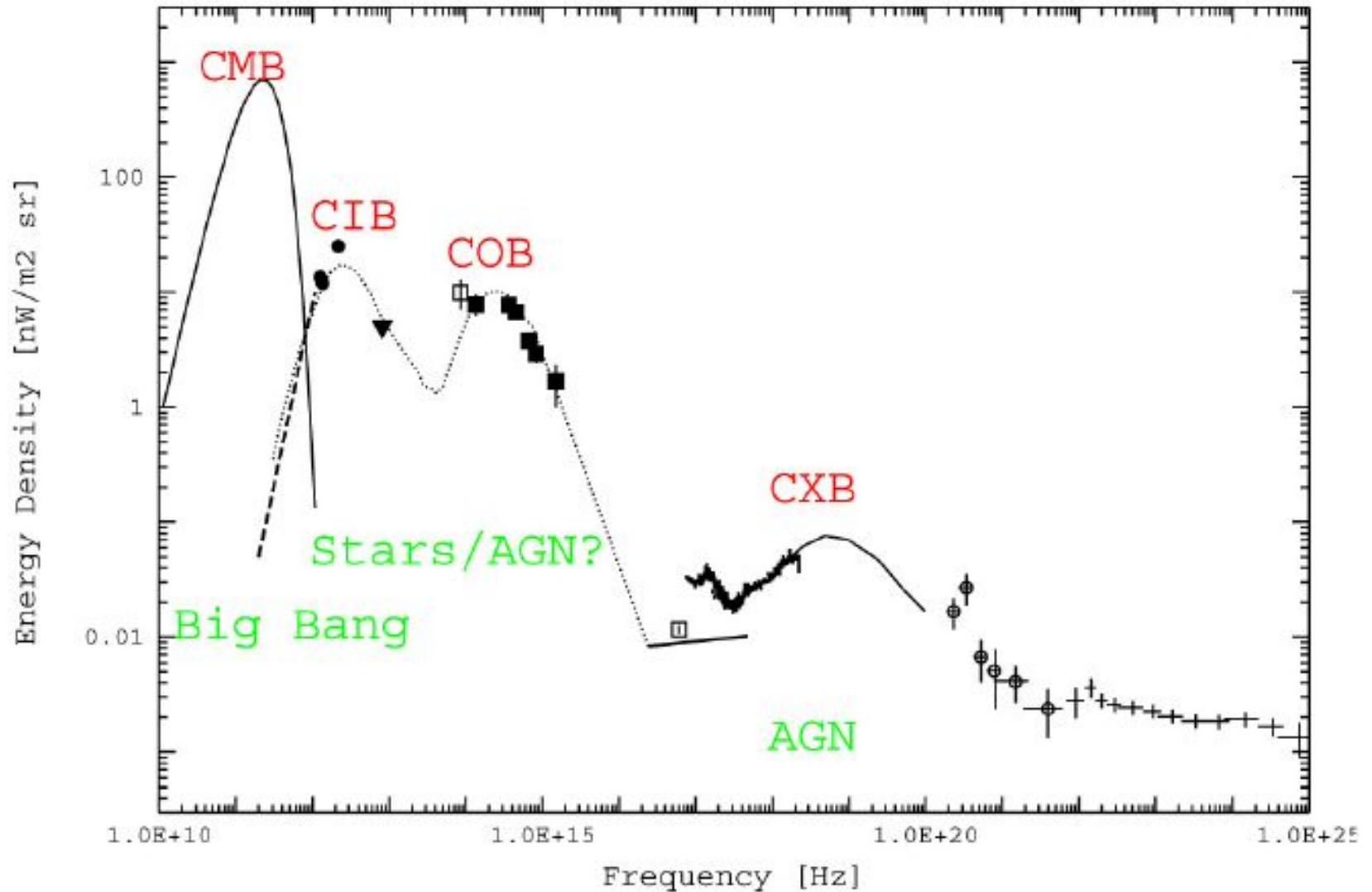


# Два семейства методов

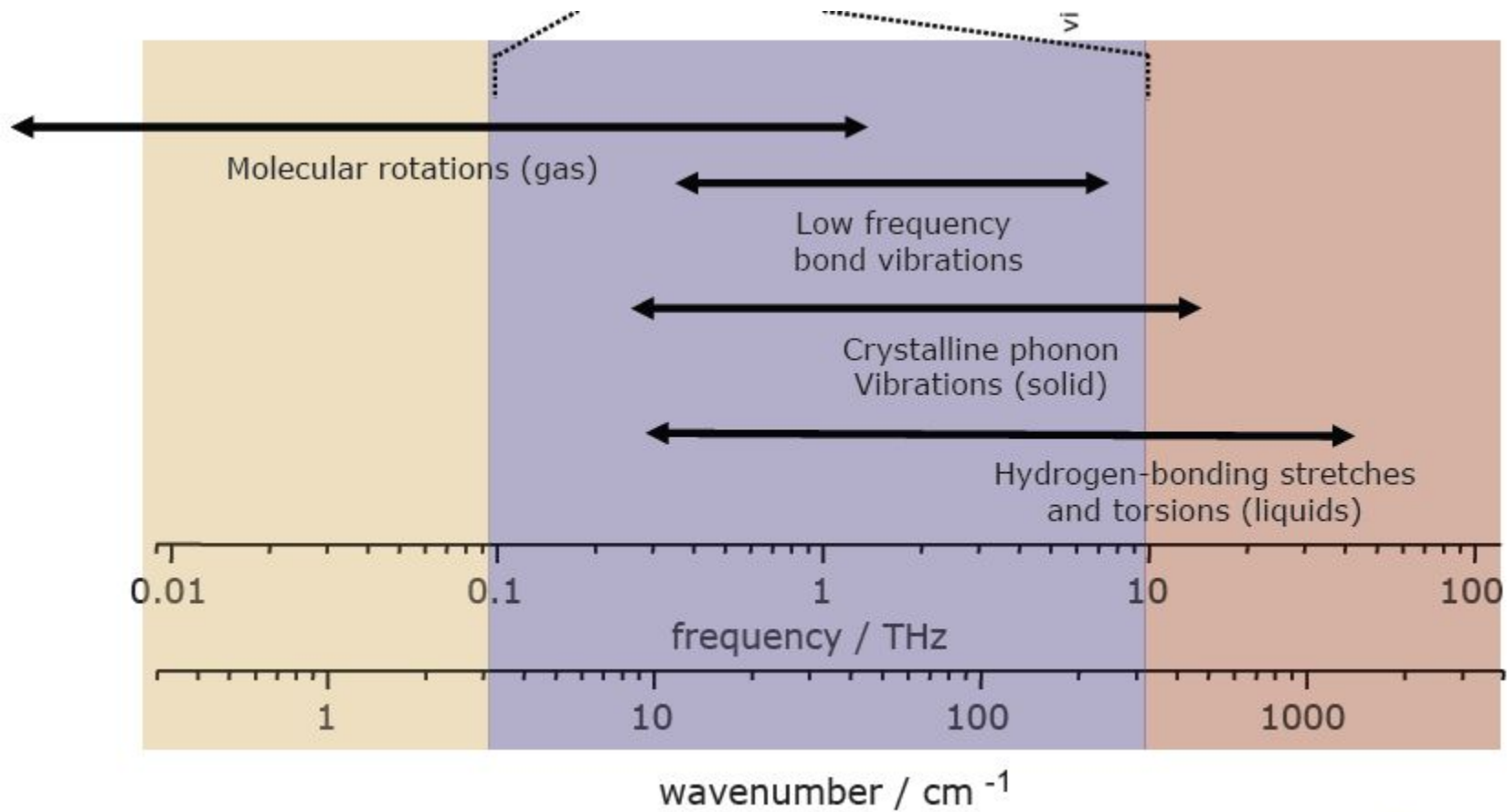
- **Понижение частоты квантово-оптических методов**
  - Низкое спектральное разрешение (ширина линии источников  $>10$  кГц), акустооптика, брэгговские решетки, детекторы мощности
- **Увеличение рабочей частоты радиофизических методов**
  - Все функциональные элементы могут быть представлены в виде R,L,C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

# Радиоастрономия

The Cosmic Energy Density Spectrum

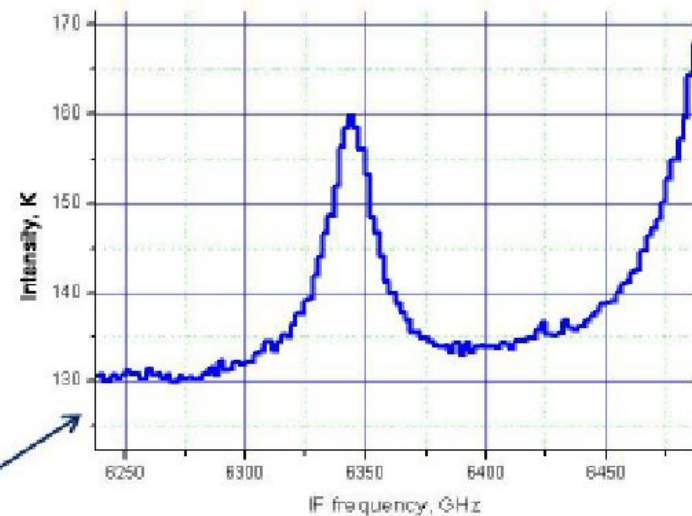
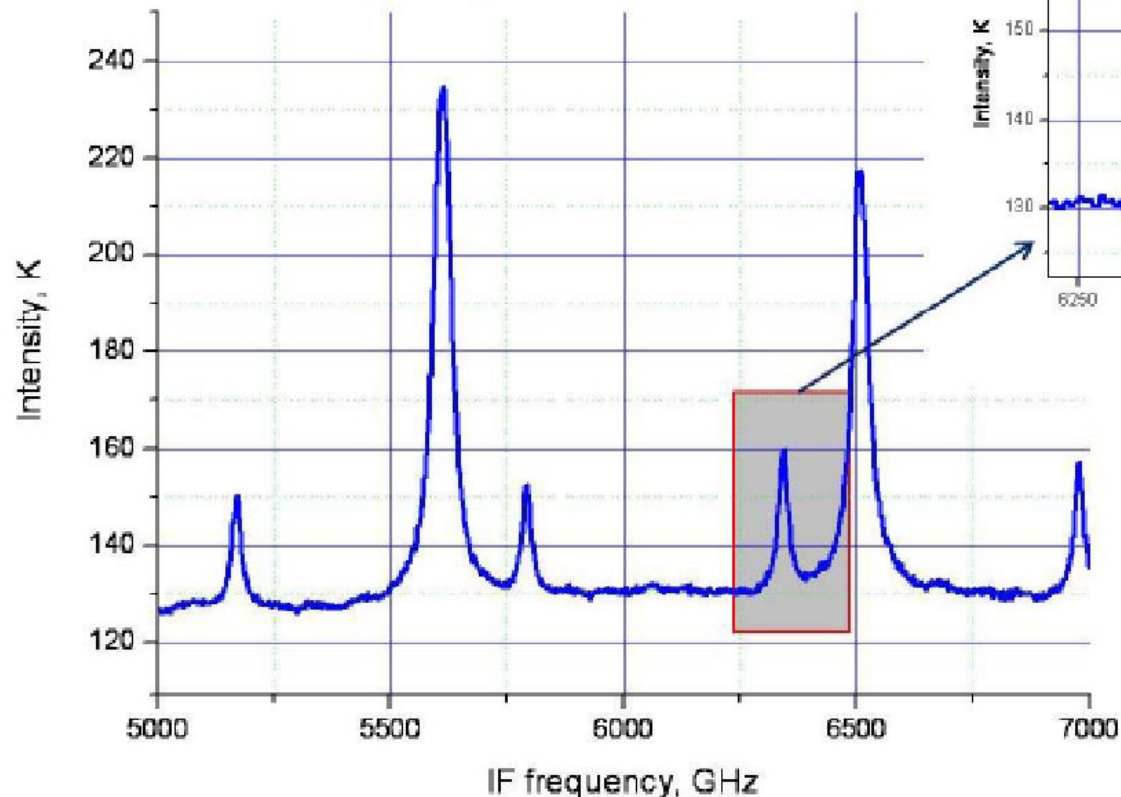


# Спектроскопия



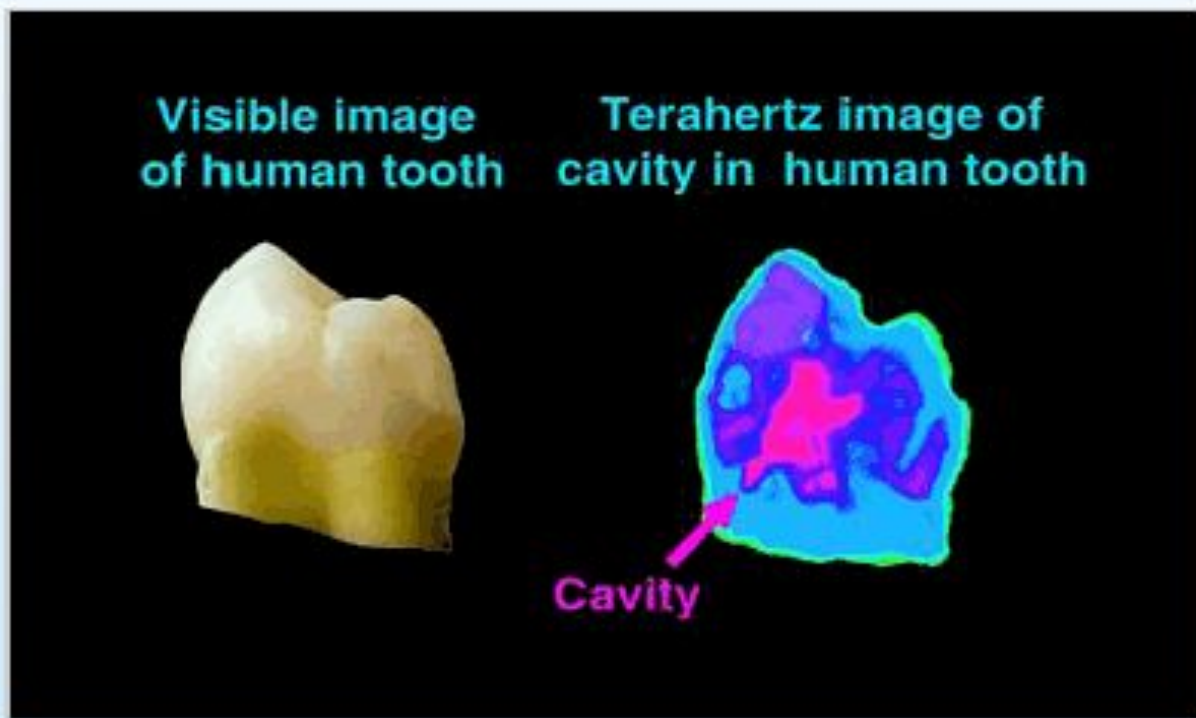
# Пример спектра, измеренного гетеродинным методом

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

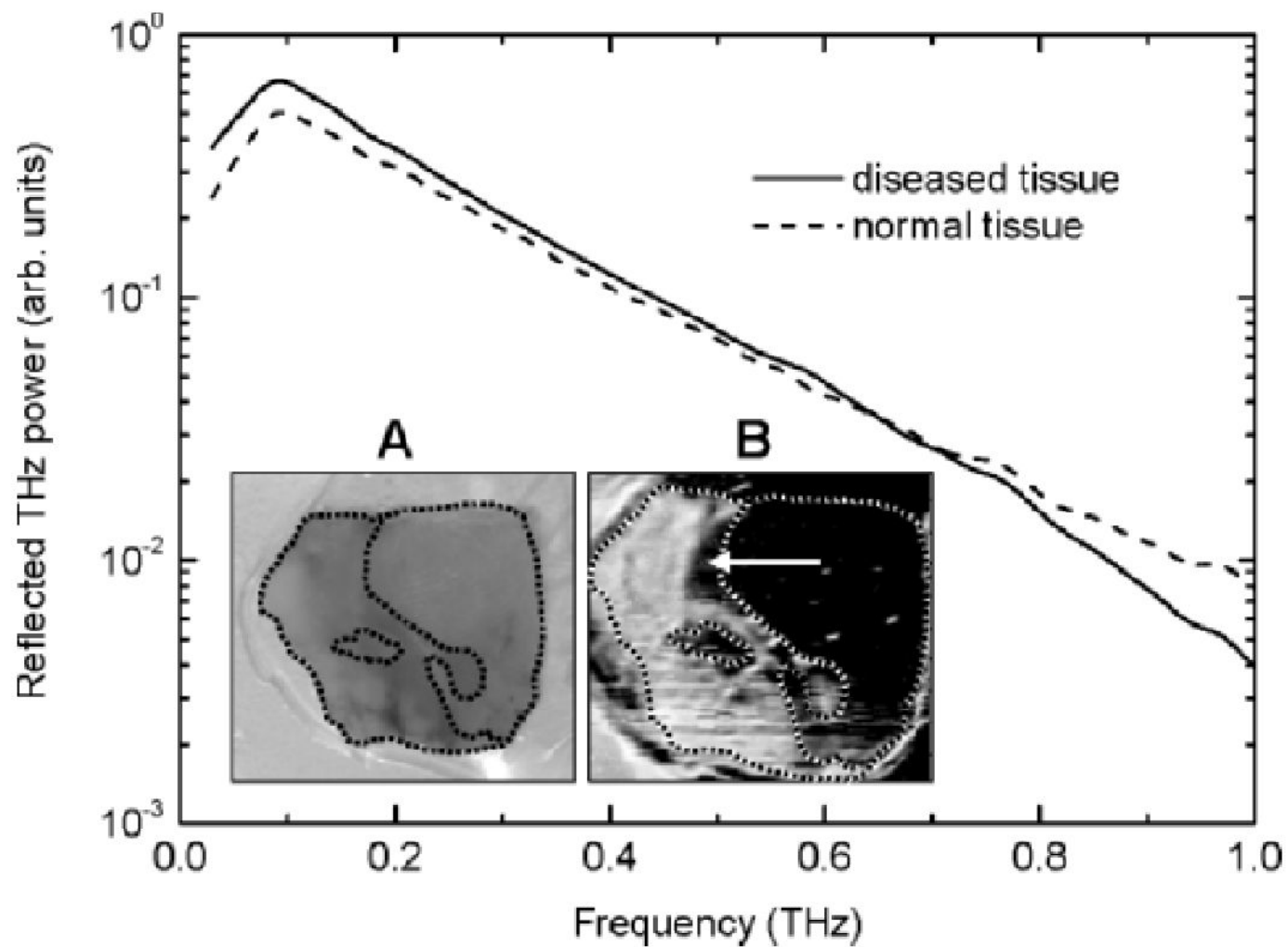
# Медицинская диагностика

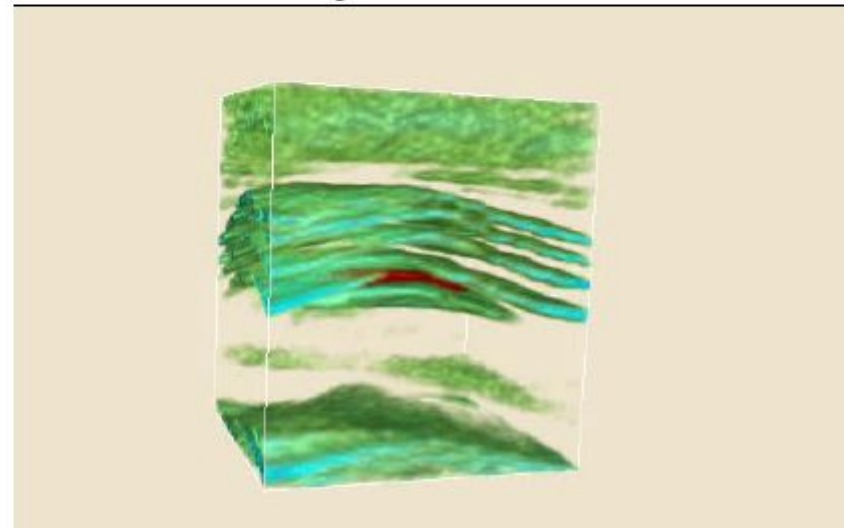
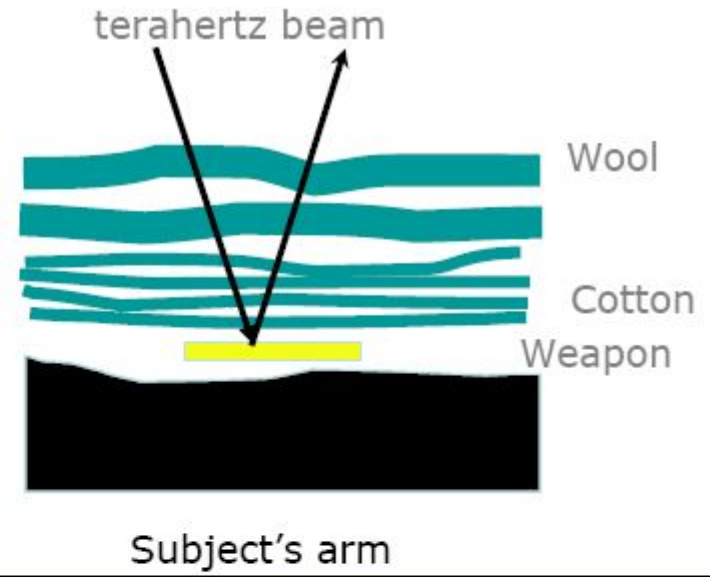
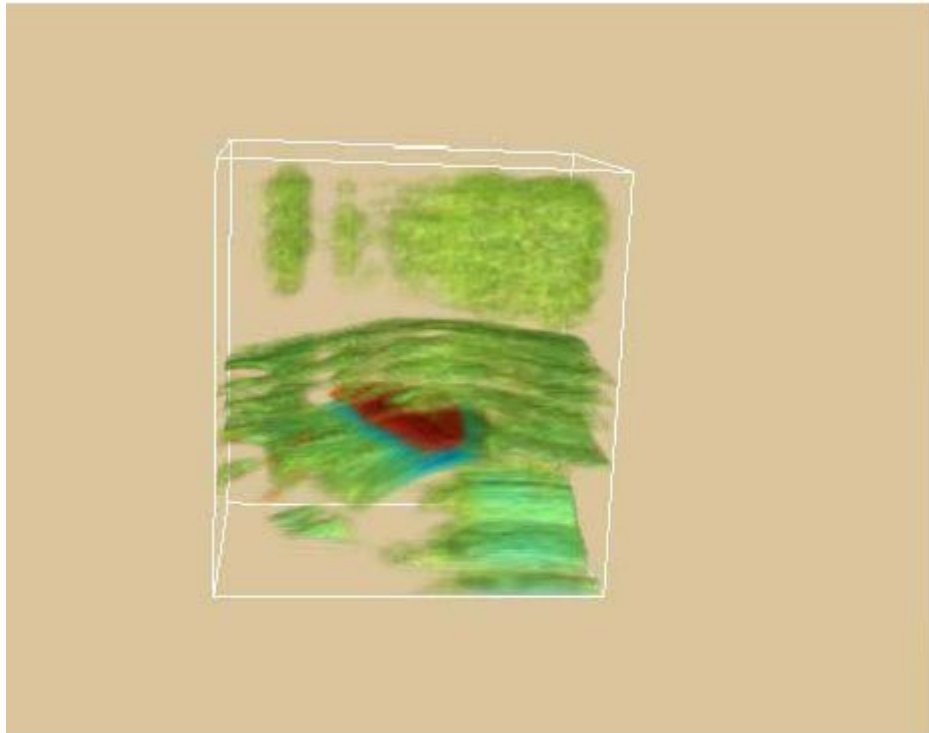


Crawley et al.  
Caries Research  
37(5):352-359  
(2003)

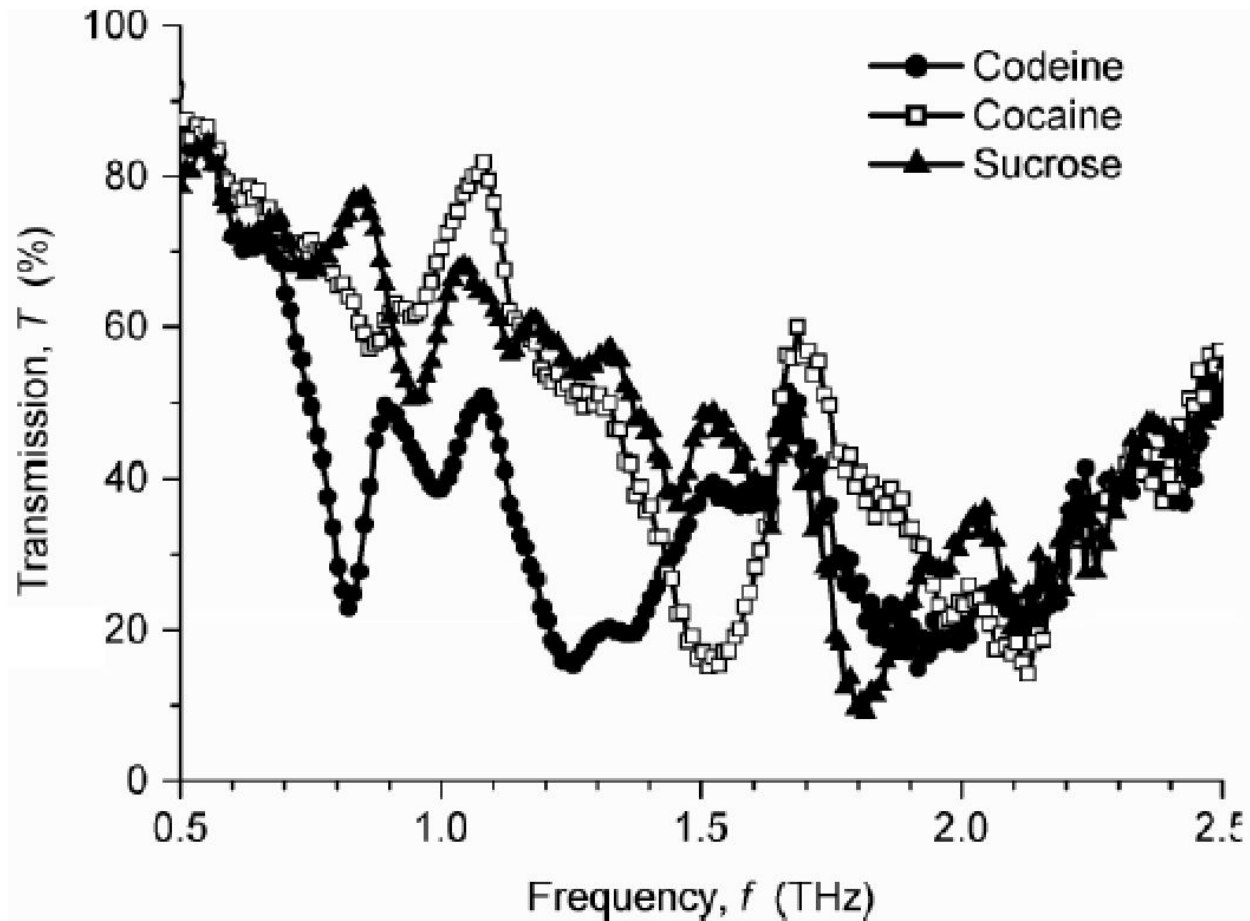


# Базально-клеточная карцинома

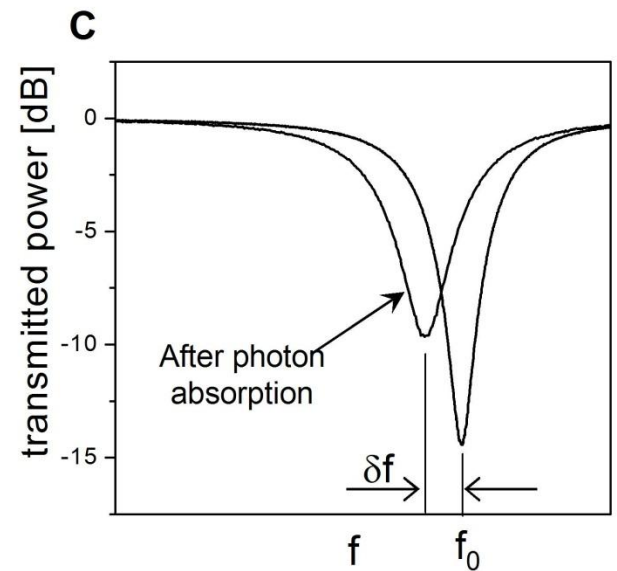
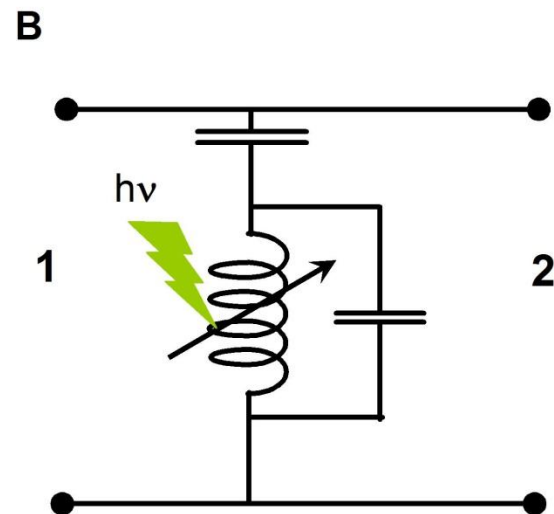
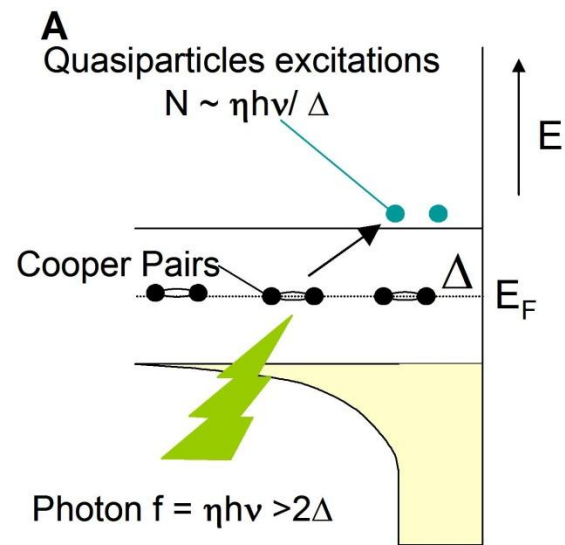




# Детектирование наркотических веществ



# Детекторы кинетической ИНДУКТИВНОСТИ



Nb

CPW Resonator

Substrate

1

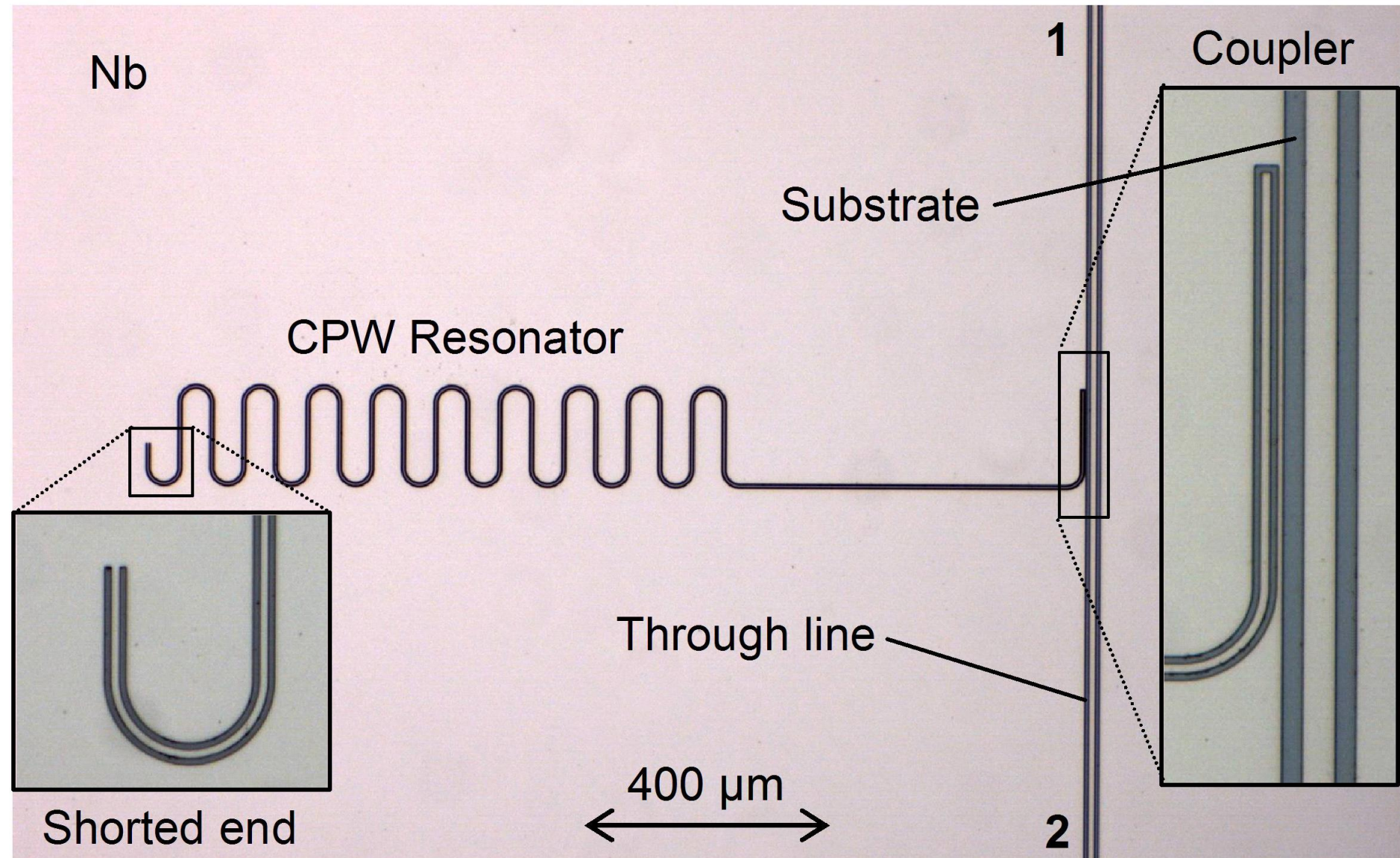
Coupler

Through line

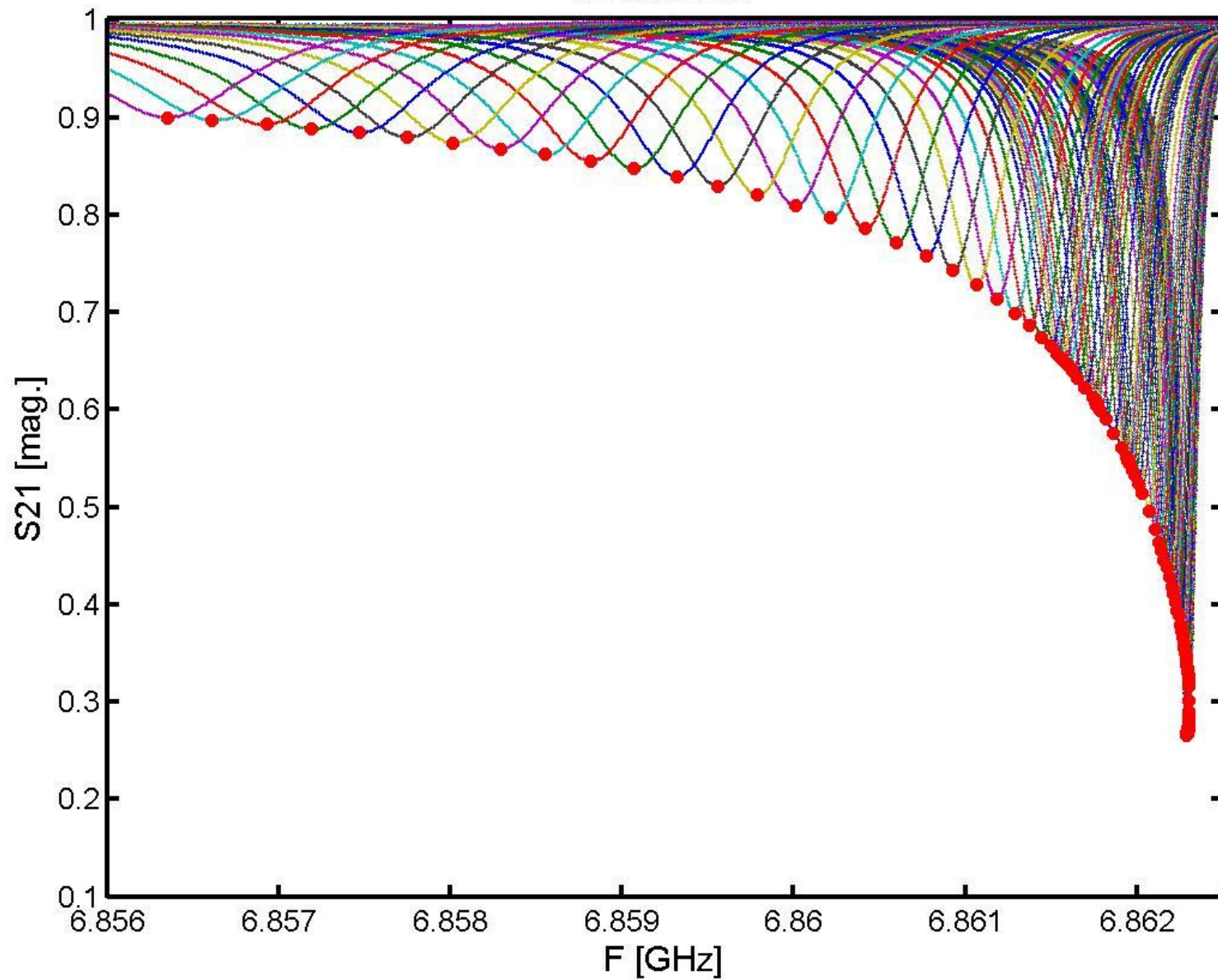
400  $\mu\text{m}$

Shorted end

2

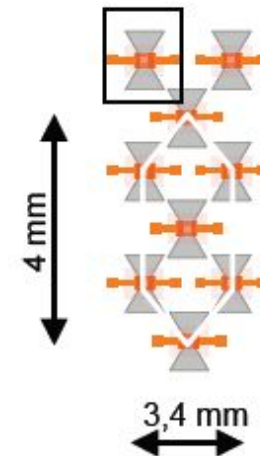
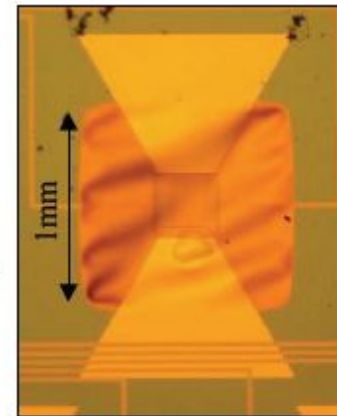
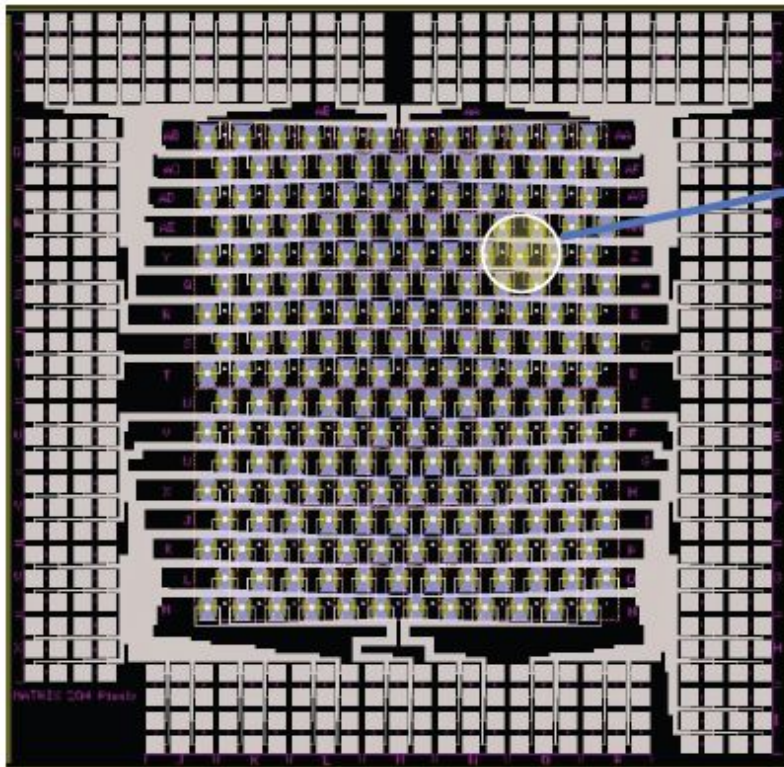


KID resonances



# Детекторы с антенной

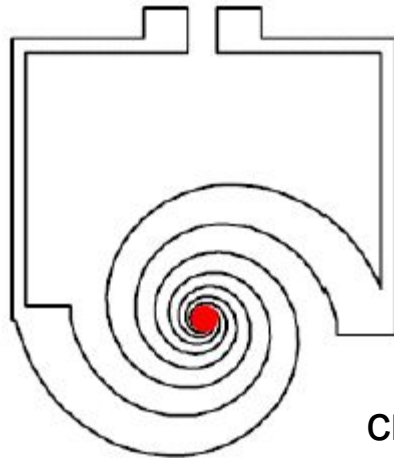
## 204 bolometers array with antennas



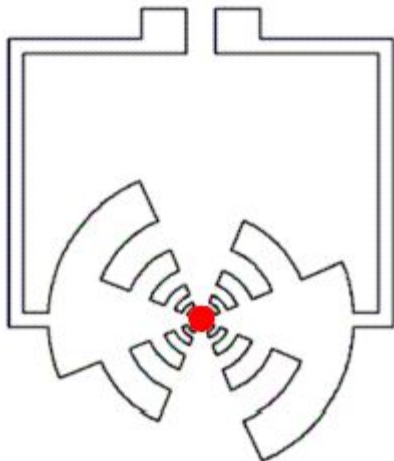
- Planar antenna network for imaging in millimeter wavelength
- Versatile fabrication process for future applications :
  - Polarisation sensitive detectors
  - Integrated frequency selection on the pixels
- Thermal sensor can be either high impedance or superconducting with NbSi

# Примеры широкополосных антенн

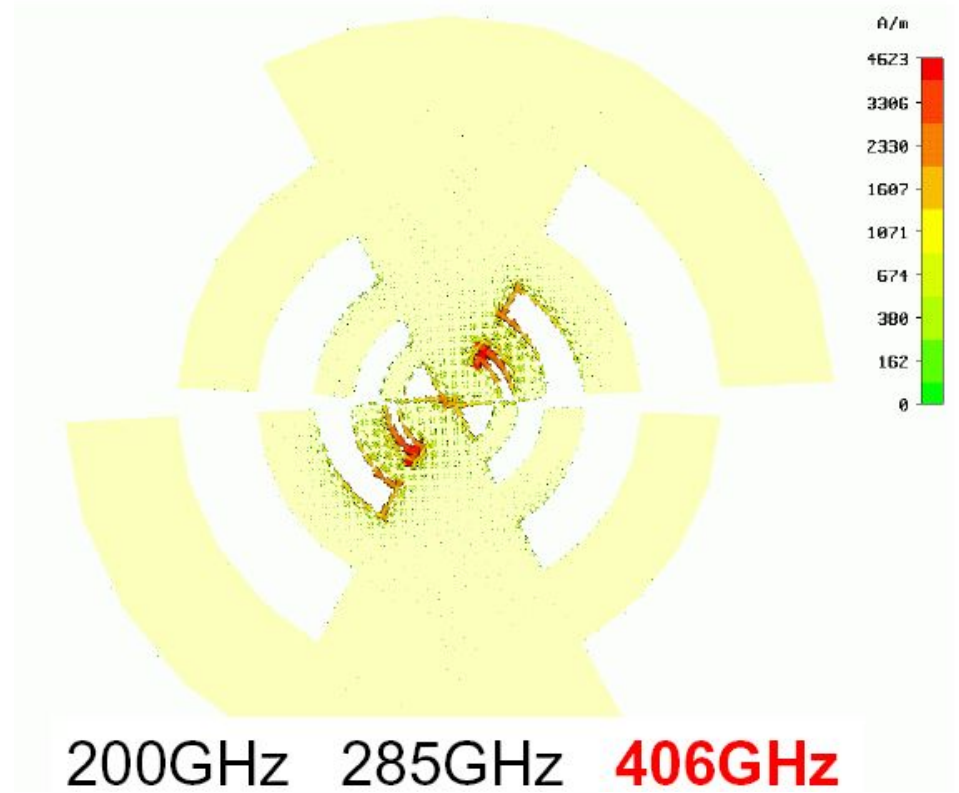
Поверхностные токи  
логопериодической антенны



спиральная

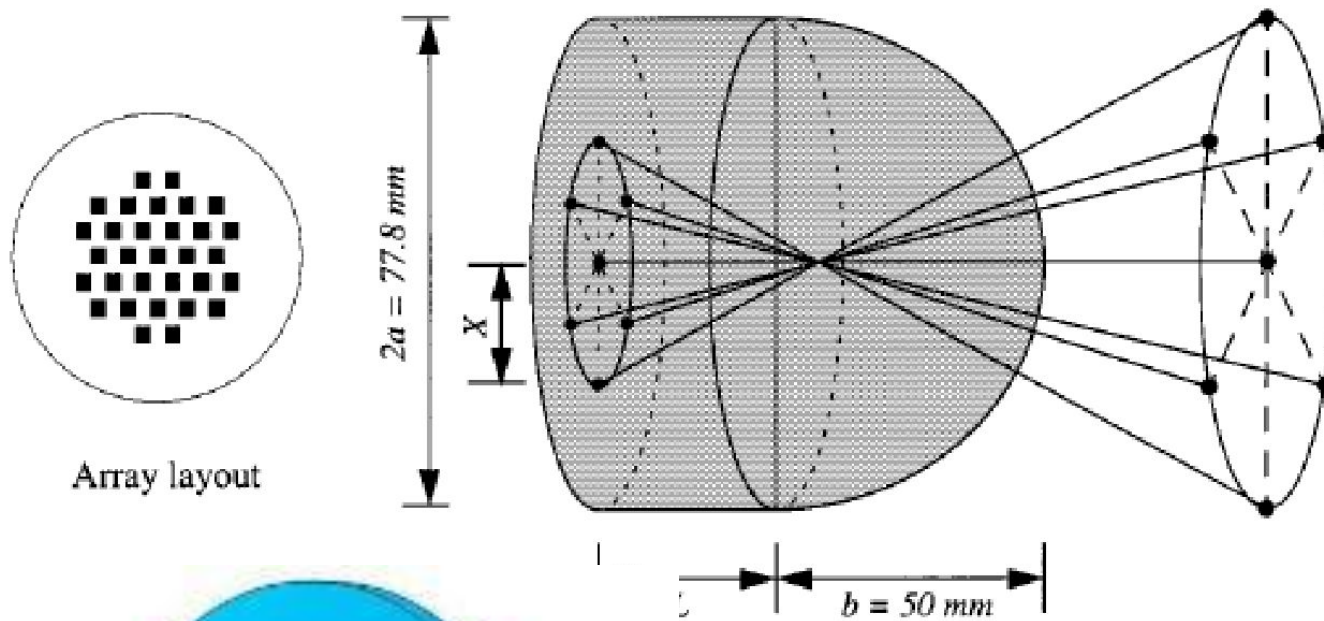


логопериодическая



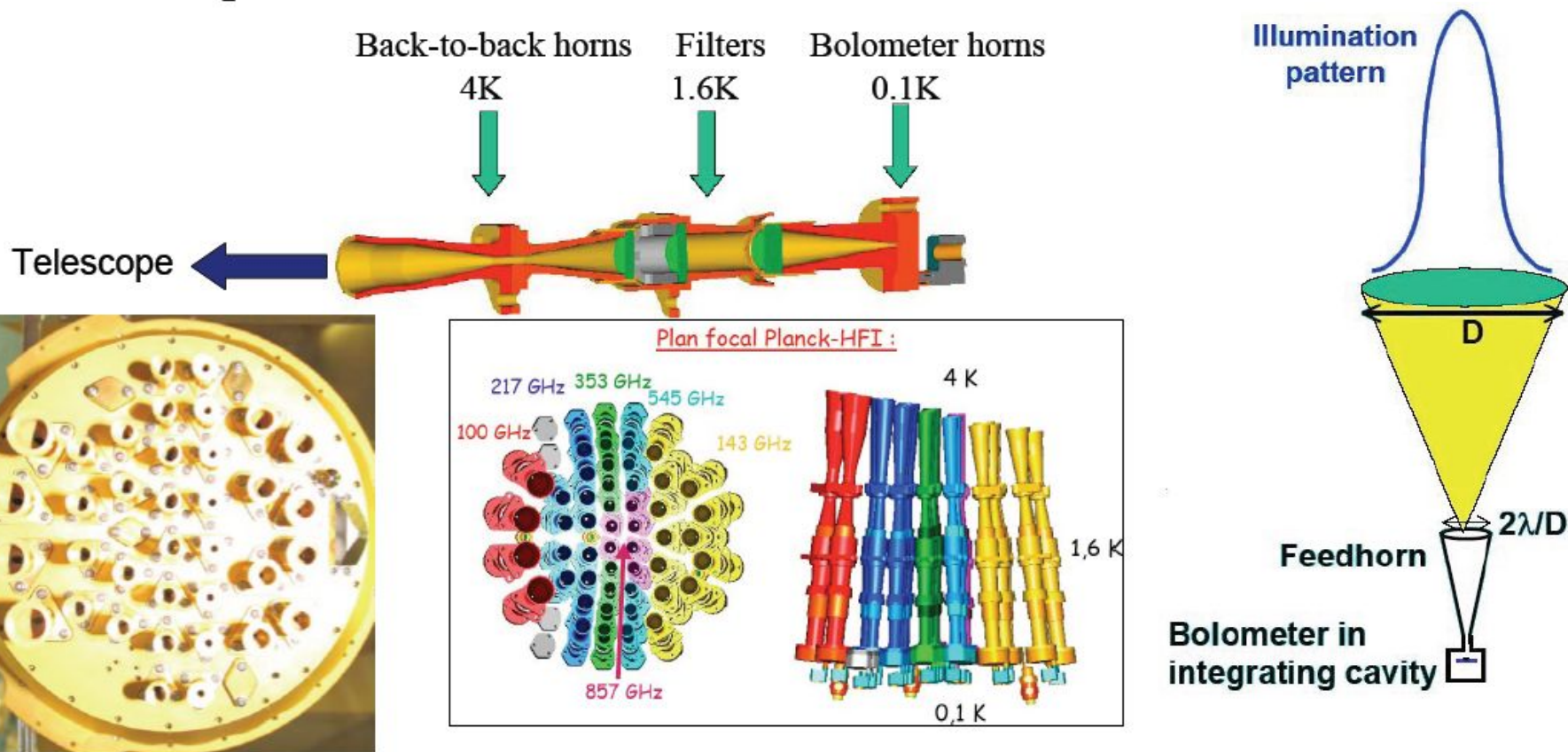


# Размещение чипа на квазиоптической линзе



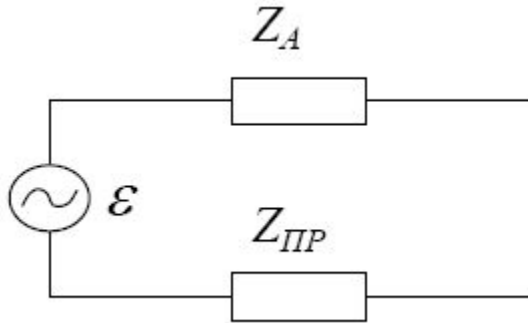
# Волноводные конструкции

## Example: Planck-HFI



Недостаток - узкополосность

# Согласование антенны с приемником



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

Импеданс антенны  $Z_A = R_A + iX_A$

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

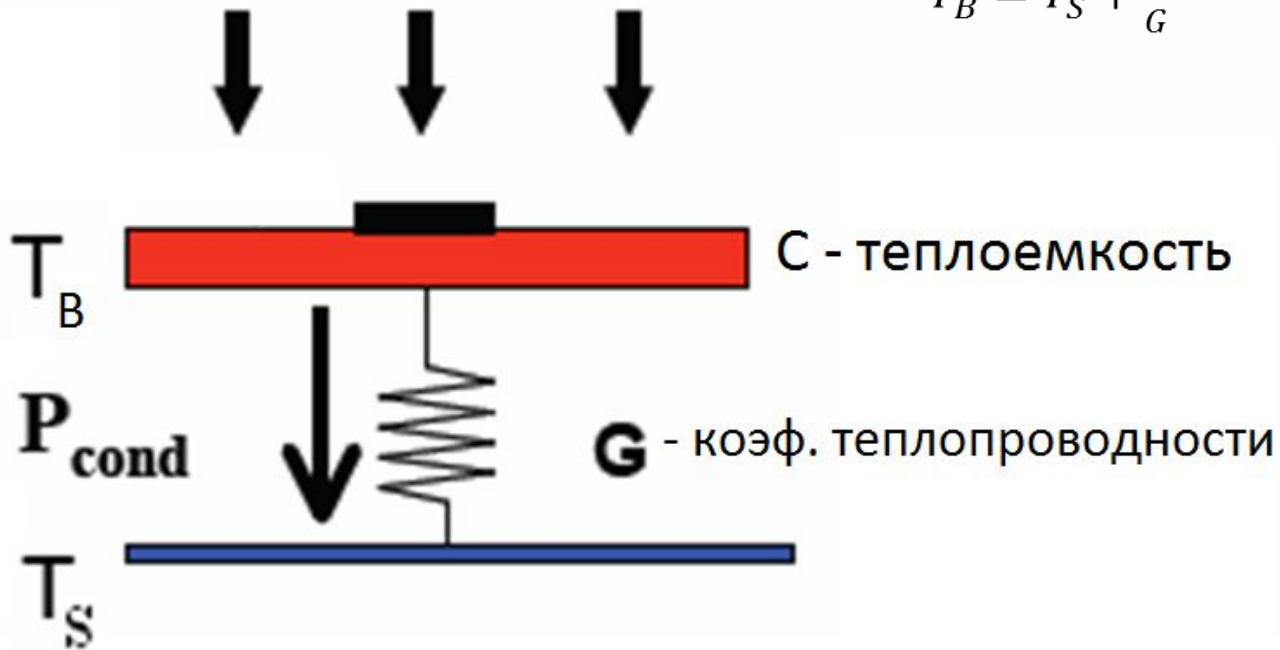
$$P_{\text{ПР}} = \frac{\varepsilon^2 \cdot R_{\text{ПР}} / 2}{(R_{\text{ПР}} + R_A)^2 + (X_{\text{ПР}} + X_A)^2}$$

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

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

# 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

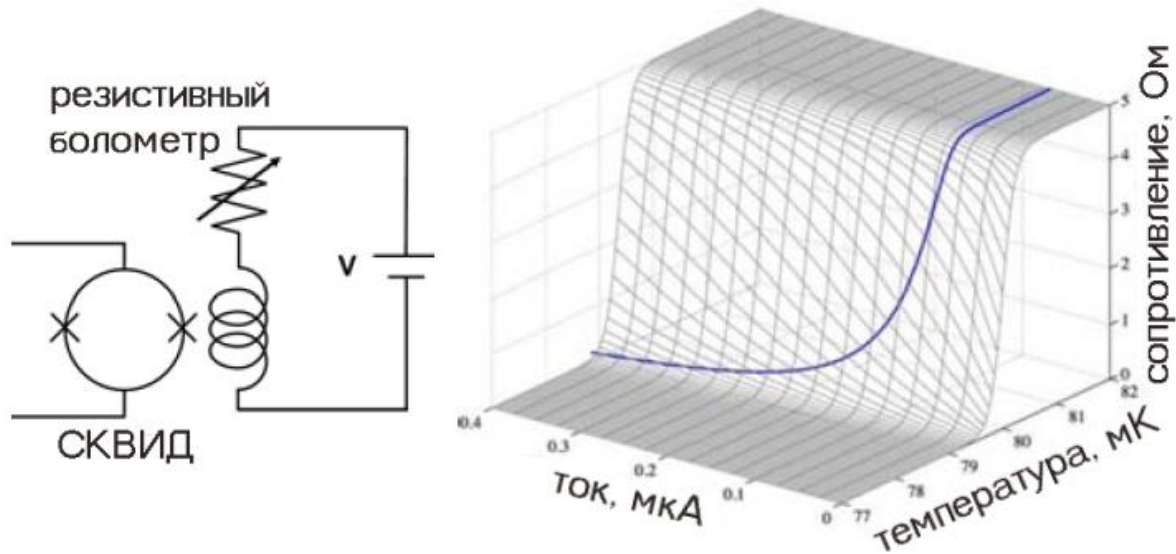
- Это оптическая мощность, приложенная к входу идеального (нешумящего) оптического приемника и создающая на выходе электрическую шумовую мощность, равную наблюдаемой на выходе фактически рассматриваемого приемника.
- Мощность сигнала на входе, при которой соотношение сигнал/шум на выходе равно 1, если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

# Собственная МЭШ болометра

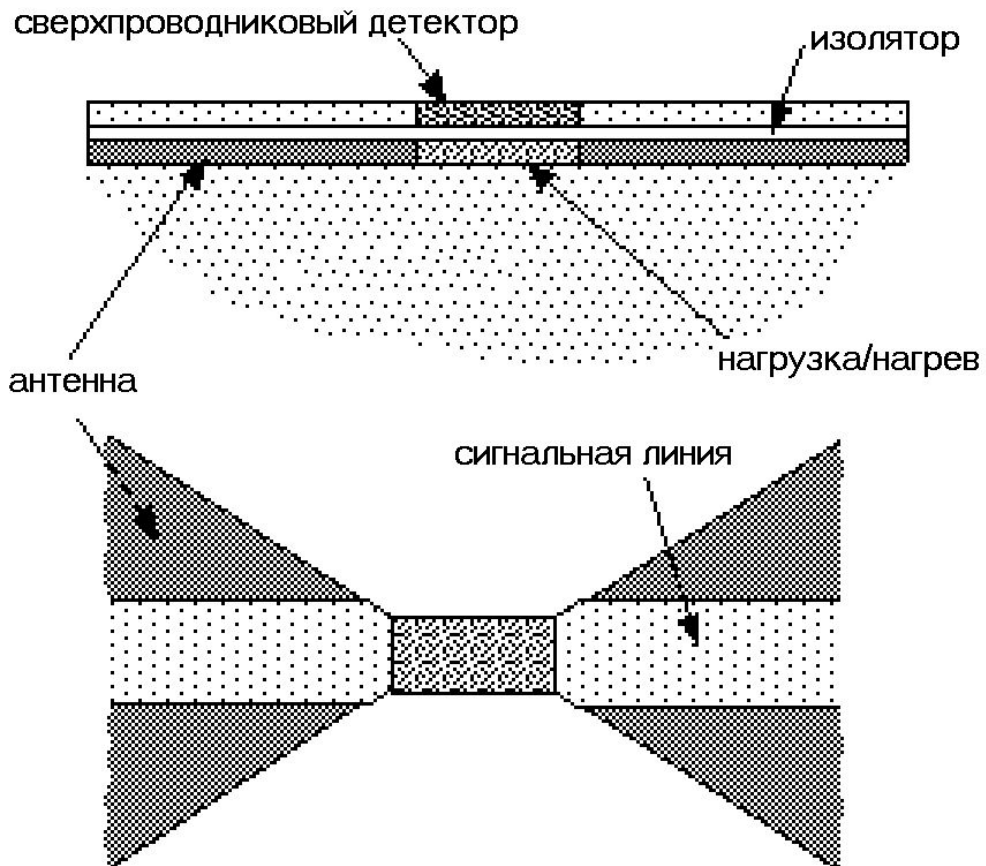
$$T_B = T_S + \frac{P}{G}$$

| Тип болометра | Энергия квантования, мкэВ | Характерный параметр абсорбера, мК | $NEP_{\text{shot}}, 10^{-19} \text{ Вт Гц}^{-1/2}$ |
|---------------|---------------------------|------------------------------------|--|
| 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  |

# 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.



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

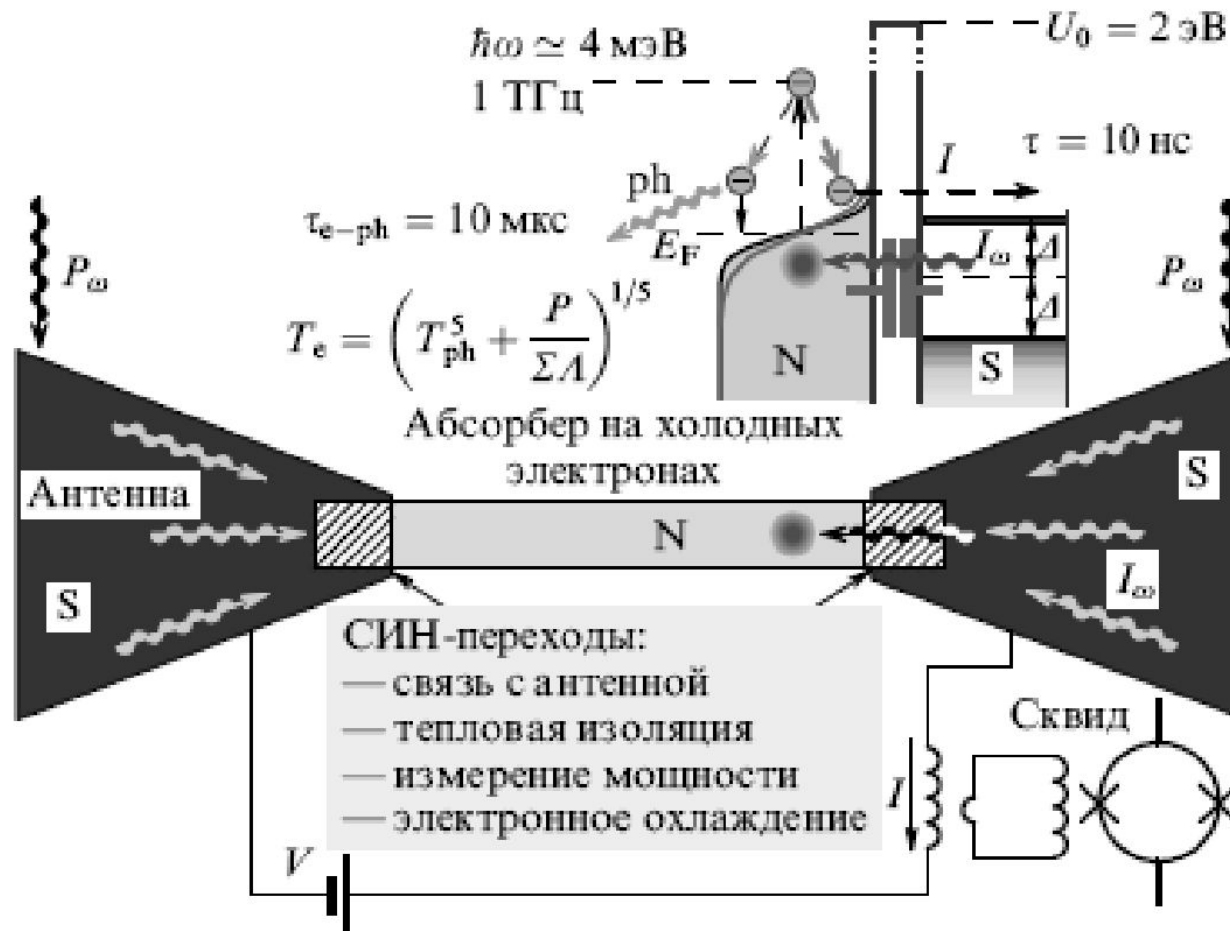
$$NEP \sim 10^{-15} \text{ W/Hz}^{0.5}$$

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

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

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

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

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

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

| Тип болометра | Энергия<br>квантования,<br>мкэВ | Характерный<br>параметр<br>абсорбера, мК | $NEP_{shot},$<br>$10^{-19} \text{ Вт Гц}^{-1/2}$ |
|---------------|---------------------------------|--|--|
| 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

