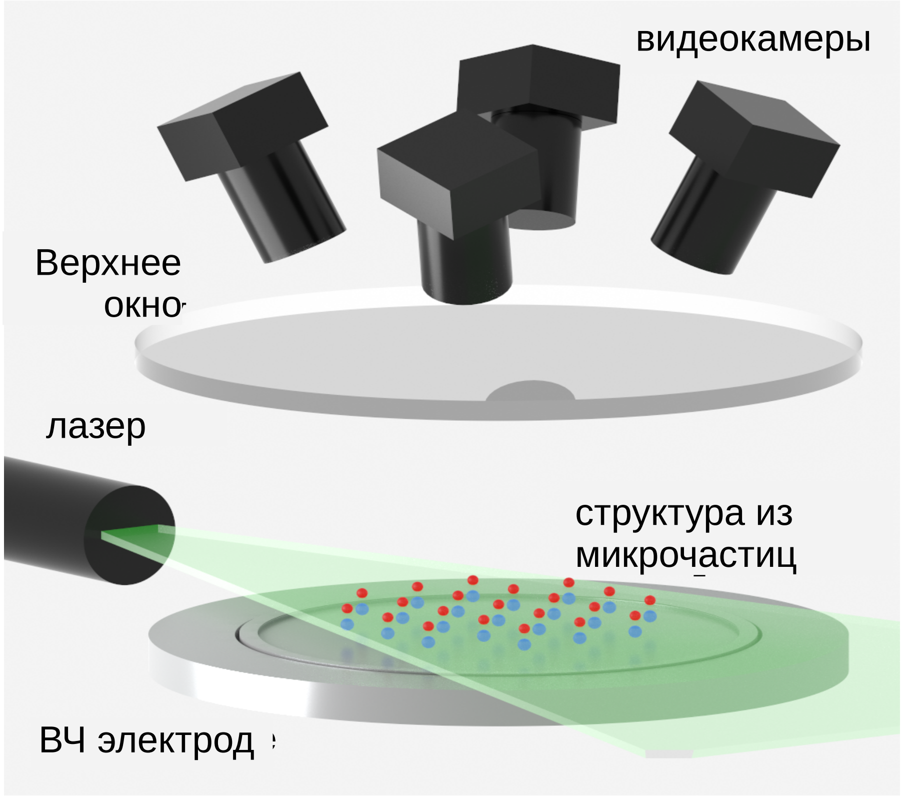
Расщепление мод в двухслойном кристалле в бинарной комплексной плазме

Зобнин А.В., Липаев А.М., Наумкин В.Н., Сыроватка Р.А., Усачев А.Д.
ОИВТ РАН

Условия эксперимента

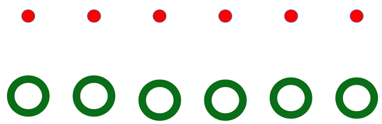


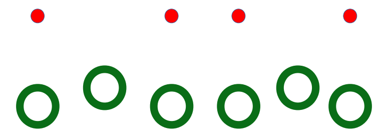
Камера «Zyflex»

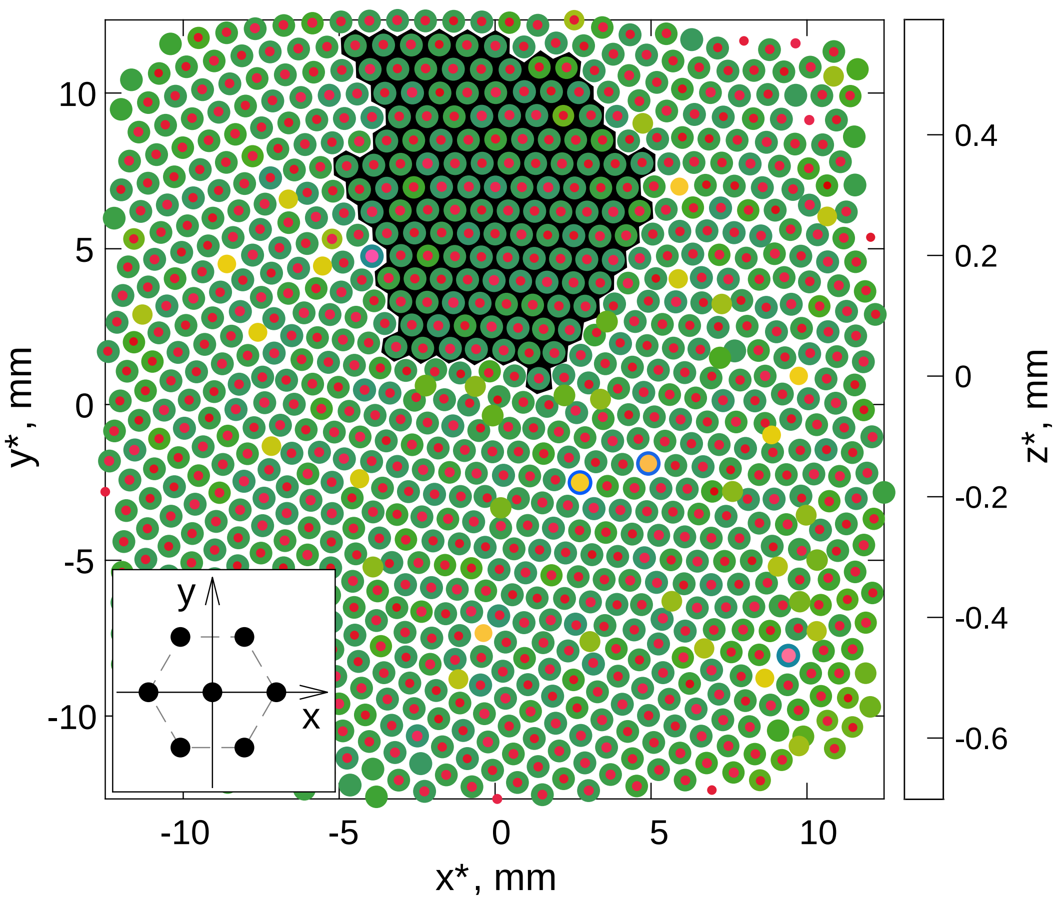
Ar, P=3 Па, V_{p-p}=144 В, V_{sh}=49 В

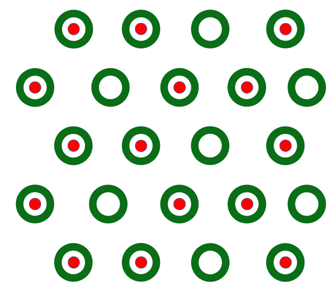
частицы PMF диаметром 7.17 мкм и 10.41 мкм

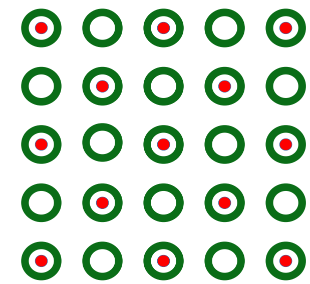
Структуры микрчастиц











расстояние между частицами в слое 0.87 мм,
расстояние между слоями 1.0 мм

Параметры видеосъёмки и методы обработки

4 камеры по 4 М, 179 кадров в секунду синхронно.

Восстановление трёх координат методом триангуляции с точностью 3.2 мкм по горизонтали и 16 мкм по вертикали.

По смещениям между соседними кадрами определялись скорости частиц, средняя скорость за интервал 20 с вычиталась для каждой частицы.

Преобразование Фурье скоростей по времени проводилось для интервала 20 с. Преобразование Фурье по координатам проводилось в пределах выделенного домена вдоль осей x, y и z.

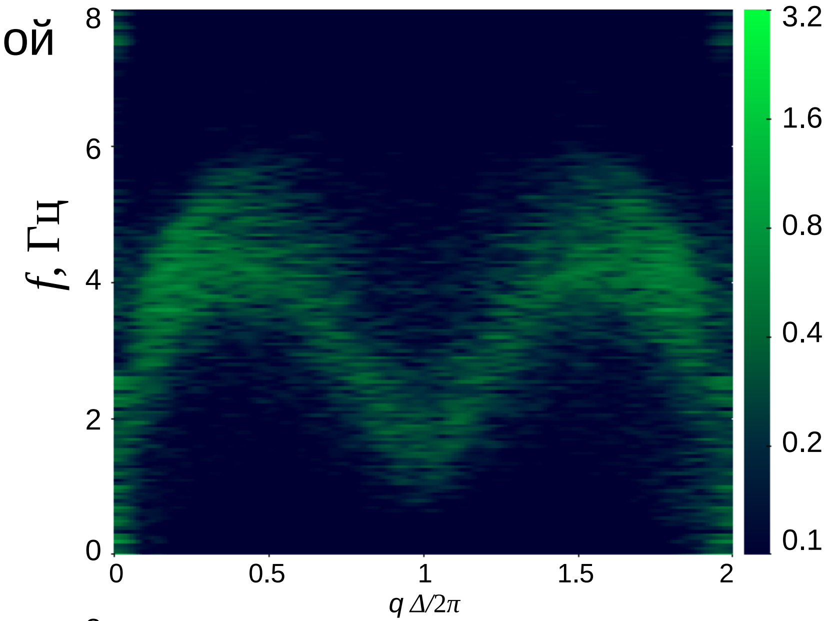
Спектры случайных скоростей в горизонтальной плоскости

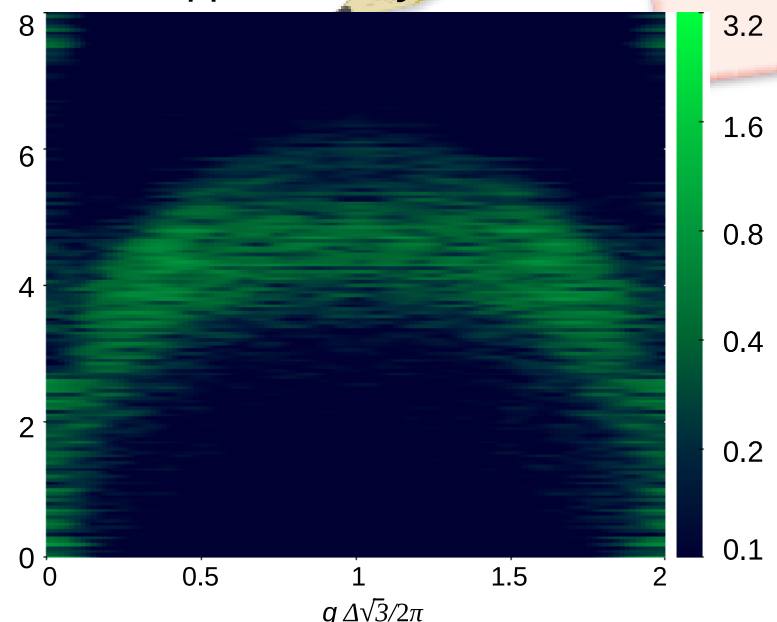
Продольные моды

вдоль оси *x*

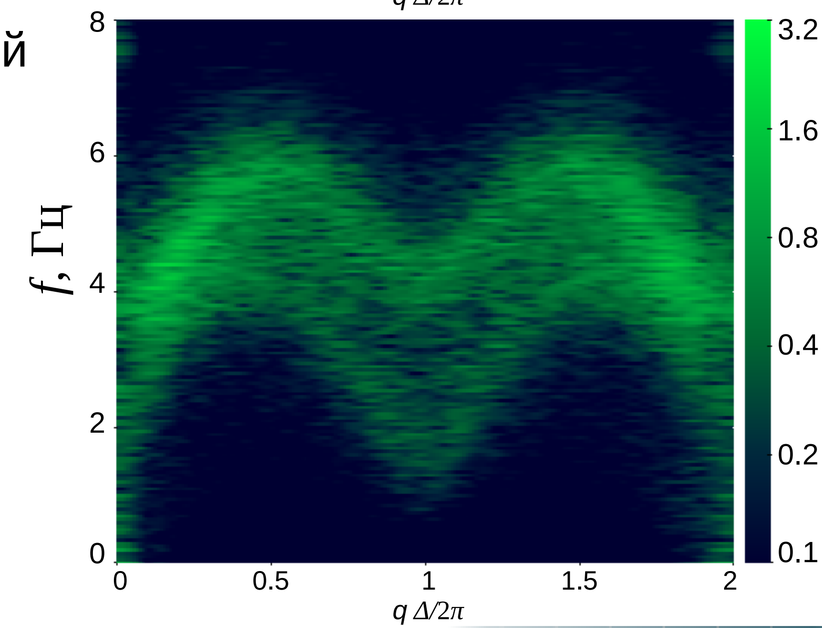
вдоль оси *y*

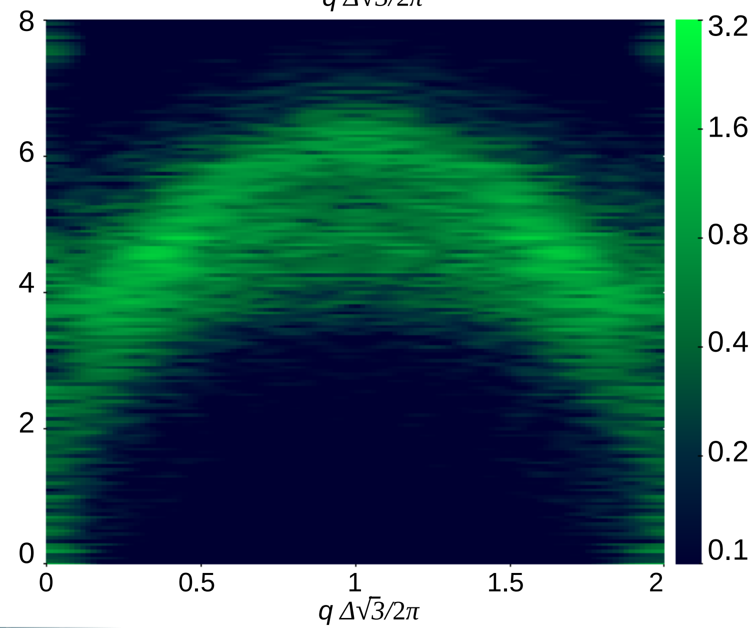
Верхний слой (7.17 мкм)





Нижний слой (10.41 мкм)





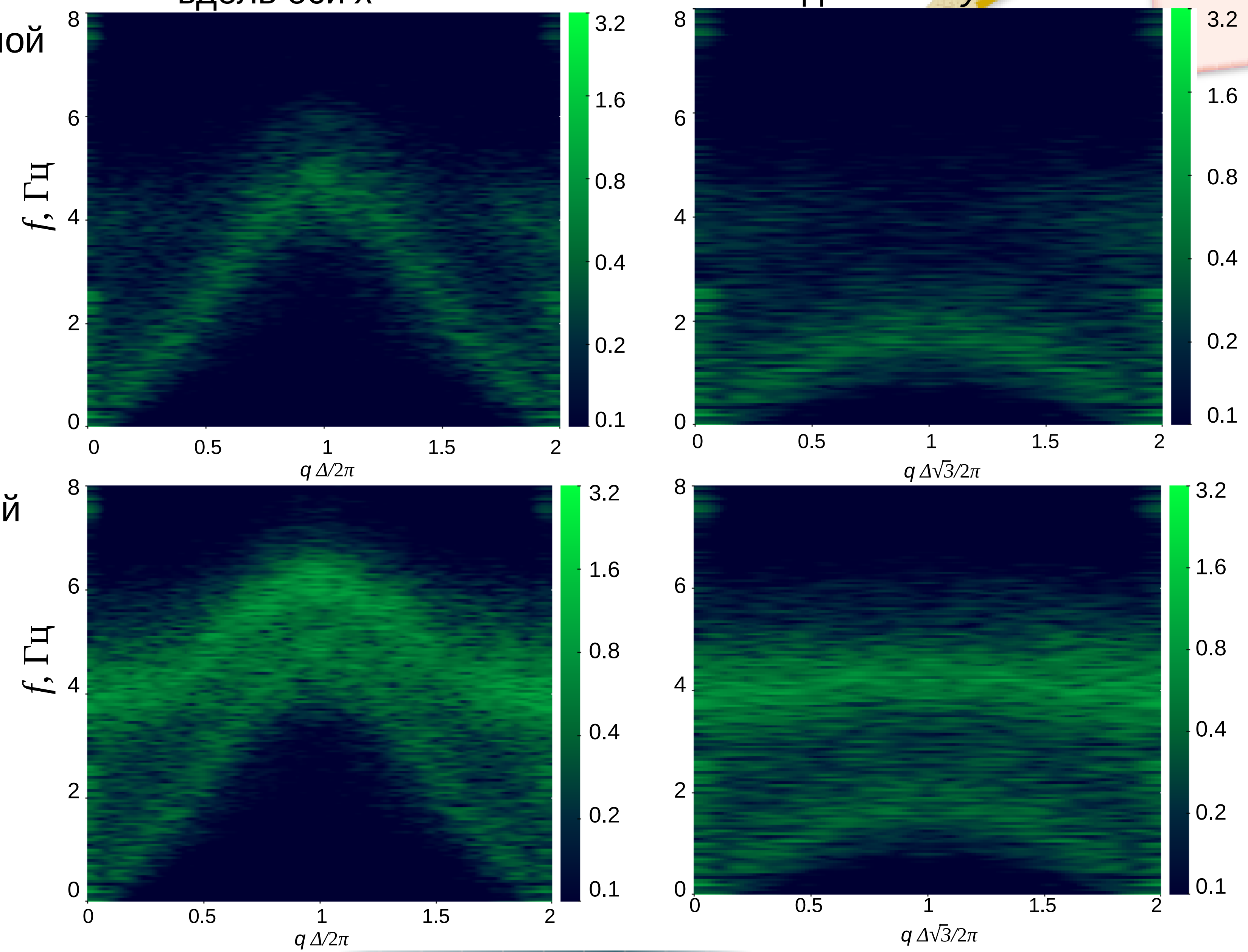
Спектры случайных скоростей в горизонтальной плоскости

Поперечные моды в плоскости структуры

вдоль оси *x* — вдоль оси *y*

Верхний слой (7.17 мкм)

Нижний слой (10.41 мкм)



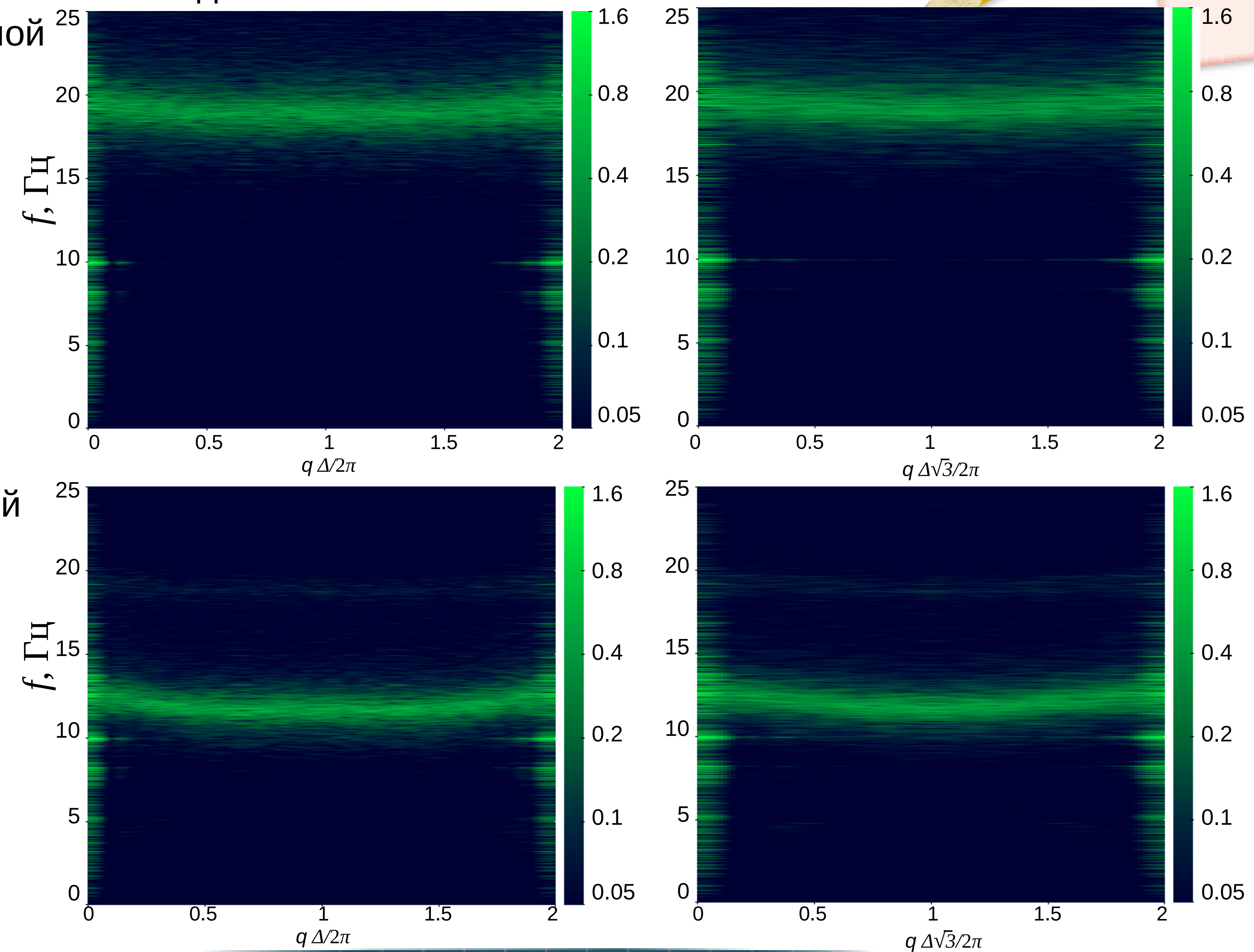
Спектры случайных скоростей в вертикальном направлении

Поперечные моды вертикальных колебаний

вдоль оси *x* вдоль оси *y*

Верхний слой (7.17 мкм)

Нижний слой (10.41 мкм)



Моды колебаний в однослойных структурах

Приближение малых амплитуд и потенциала Юкава

X. Wang, et. al., Phys. Rev. Lett. 86, 2569 (2001);
G. J. Kalman, et. al., Phys. Rev. E 87, 043103 (2013)

$$\tilde{\omega}^2(q) = -\sum_{k,k\neq j} \frac{Q^2 K_{jk}}{m}\left(1-\cos\left(q\left(r_k - r_j\right)\right)\right)$$

$$\omega = \left(\tilde{\omega}^2 - \nu^2/4\right)^{0.5} - i\nu/2$$

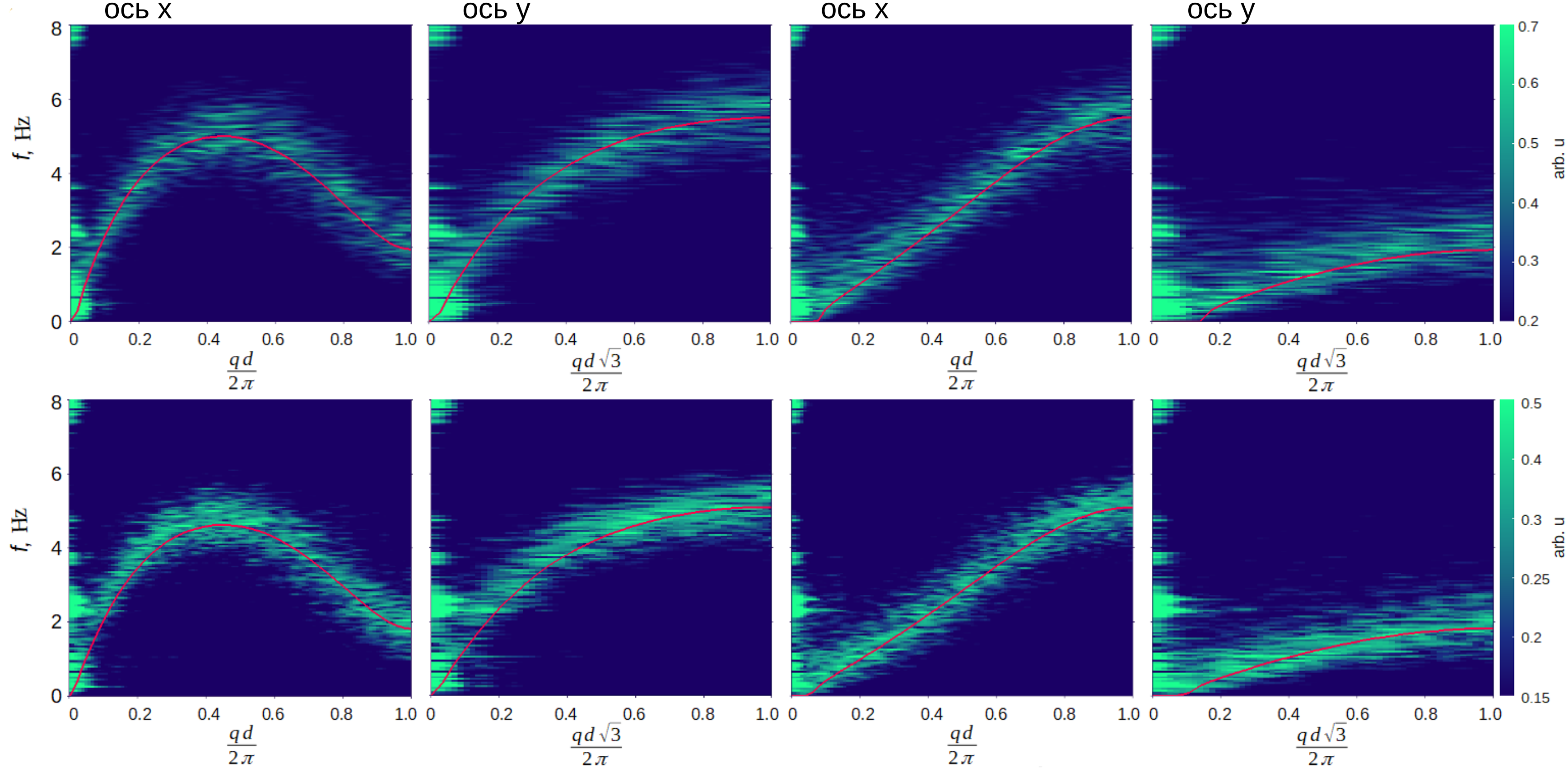
$$K_{jk} = -\frac{\exp\left(\frac{\sqrt{x_{jk}^2+y_{jk}^2}}{\lambda_{scr}}\right)}{\left(x_{jk}^2+y_{jk}^2\right)^{5/2}}\left(\left(2x_{jk}^2 - y_{jk}^2\right)\left(1+\frac{\sqrt{x_{jk}^2+y_{jk}^2}}{\lambda_{scr}}\right) + \frac{\left(x_{jk}^2+y_{jk}^2\right)x_{jk}^2}{\lambda_{scr}^2}\right)$$

продольные моды — ось x, ось y

поперечные моды — ось x, ось y

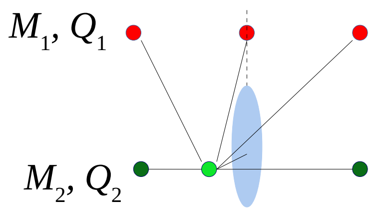
7.17 мкм

10.41 мкм



$Z_{7.2}$ = 9400±200, $Z_{10.4}$=17900±400, λ_{scr}=0.8±0.1 мм

Моды колебаний в двухслойных структурах



$$\begin{cases} (\omega(\omega+i\nu_1)-\omega_1^2(q)-\mu\eta(0))a_1+\mu\eta(q)a_2=0 \\ (\omega(\omega+i\nu_2)-\omega_2^2(q)-\eta(0)/\mu-\theta_w)a_2+(\eta(q)/\mu+\theta_w)a_1=0 \end{cases}$$

$$\mu=\sqrt{m_2/m_1}$$

$$\omega_1^2(q)=-\sum_{k,k\neq j}\frac{Q_1^2K_{1jk}}{m_1}(1-\cos(q(r_k-r_j)))$$

$$\omega_2^2(q)=-\sum_{k,k\neq j}\frac{Q_2^2K_{1jk}}{m_2}(1-\cos(q(r_k-r_j)))$$

$$K_{1jk}=-\frac{\exp\left(\frac{\sqrt{x_{jk}^2+y_{jk}^2}}{\lambda_{scr}}\right)}{(x_{jk}^2+y_{jk}^2)^{5/2}}\left((2x_{jk}^2-y_{jk}^2)\left(1+\frac{\sqrt{x_{jk}^2+y_{jk}^2}}{\lambda_{scr}}\right)+\frac{(x_{jk}^2+y_{jk}^2)x_{jk}^2}{\lambda_{scr}^2}\right)$$

$$\eta(q)=-\sum_k\frac{Q_1Q_2K_{2jk}}{\sqrt{m_1m_2}}\cos(q(r_k-r_j))$$

$$K_{12jk}=-\frac{\exp\left(\frac{\sqrt{x_{jk}^2+y_{jk}^2+d^2}}{\lambda}\right)}{(x_{jk}^2+y_{jk}^2+d^2)^{5/2}}\left((2x_{jk}^2-y_{jk}^2-d^2)\left(1+\frac{\sqrt{x_{jk}^2+y_{jk}^2+d^2}}{\lambda}\right)+\frac{(x_{jk}^2+y_{jk}^2+d^2)x_{jk}^2}{\lambda^2}\right)$$

$$(\omega(\omega+i\nu_1)-\omega_1^2(q)-\mu\eta(0))(\omega(\omega+i\nu_2)-\omega_2^2(q)-\eta(0)/\mu-\theta_w)-\eta^2(q)-\mu\eta(q)\theta_w=0$$

Если для принять $\nu_1\approx\nu_2=\nu$, что оправдано при $\omega \gg \nu_1,\nu_2$, то уравнение сводится к квадратному.

Устойчивость двухслойного кристалла

Решения секулярного уравнения после подстановки $X=\omega(\omega+i\nu)$

$$X_{1,2}=1/2\left(\omega_1^2(q)+\omega_2^2(q)+(\mu+1/\mu)\eta(0)+\theta_w\pm\sqrt{(\omega_1^2(q)-\omega_2^2(q)+(\mu-1/\mu)\eta(0)-\theta_w)^2+4\eta(q)(\eta(q)+\mu\theta_w)}\right)$$

Если $X(0)<0$, то вертикальное упорядочивание частиц неустойчиво.
Такое возможно, если параметр θ_w достаточно мал, так что $\theta_w+(\mu+1/\mu)\eta(0)<0$.
Следуя работе *A. Ivlev, R. Kompaneets, Phys. Rev. E 95, 053202 (2017)* такую неустойчивость называют структурной.
Если при некотором волновом векторе выражение под корнем становится отрицательным, то при достаточно малом трении появляется ветвь в положительным инкрементом нарастания. Такую неустойчивость называют динамической. В отличие от структурной неустойчивости, она может быть подавлена достаточно сильным трением о газ. Для развития динамической неустойчивости должно выполняться условие

$$\frac{-4\eta(q)(\eta(q)+\mu\theta_w)-(\omega_1^2(q)-\omega_2^2(q)+(\mu-1/\mu)\eta(0)-\theta_w)^2}{\omega_1^2(q)+\omega_2^2(q)+(\mu+1/\mu)\eta(q)+\theta_w}>\nu^2$$

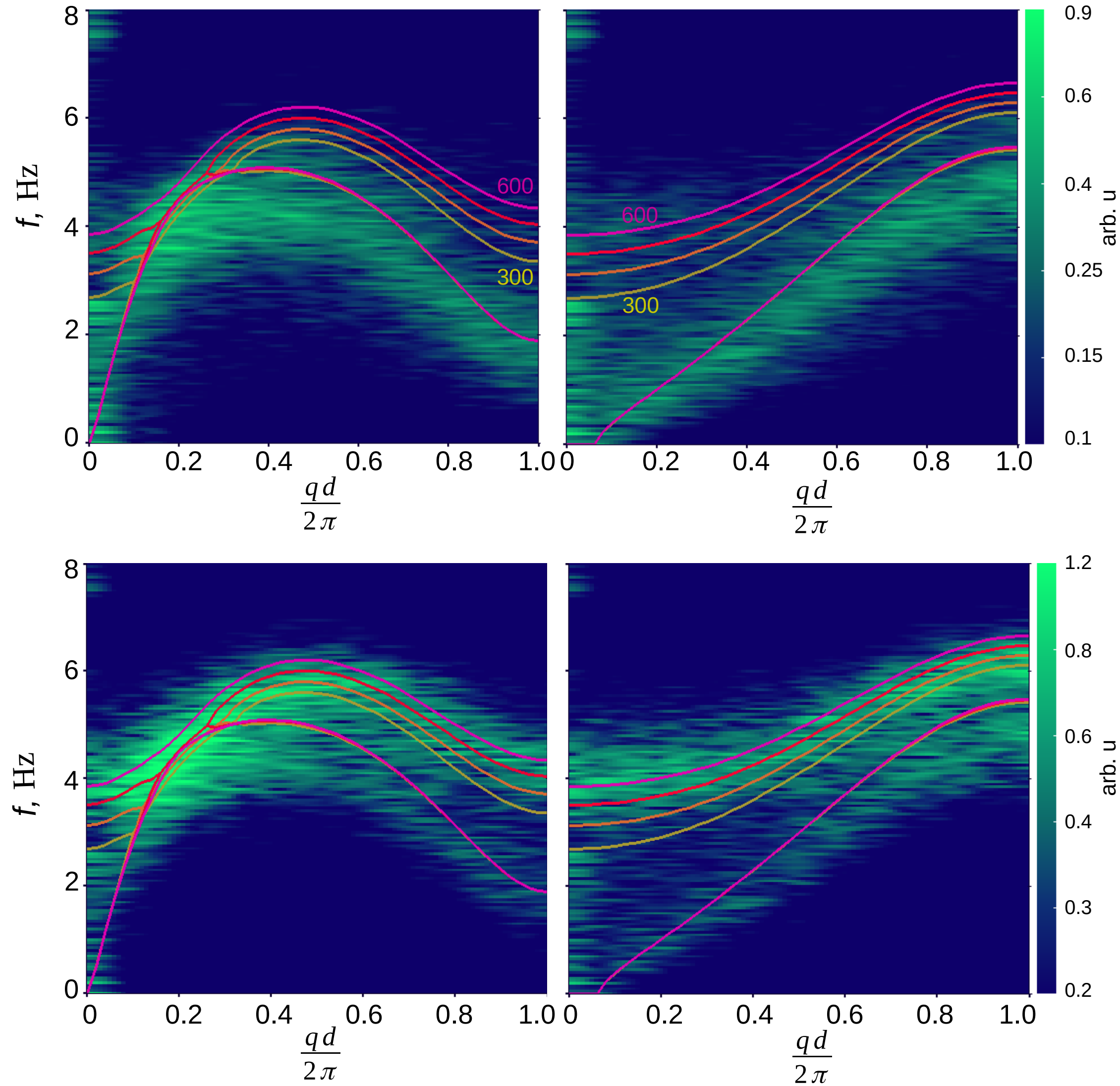
Сравнение с экспериментом

$Z_{7.2}$= 9400; $Z_{10.4}$=17900; λ_{scr}=0.8 мм. Подбор параметра θ_w

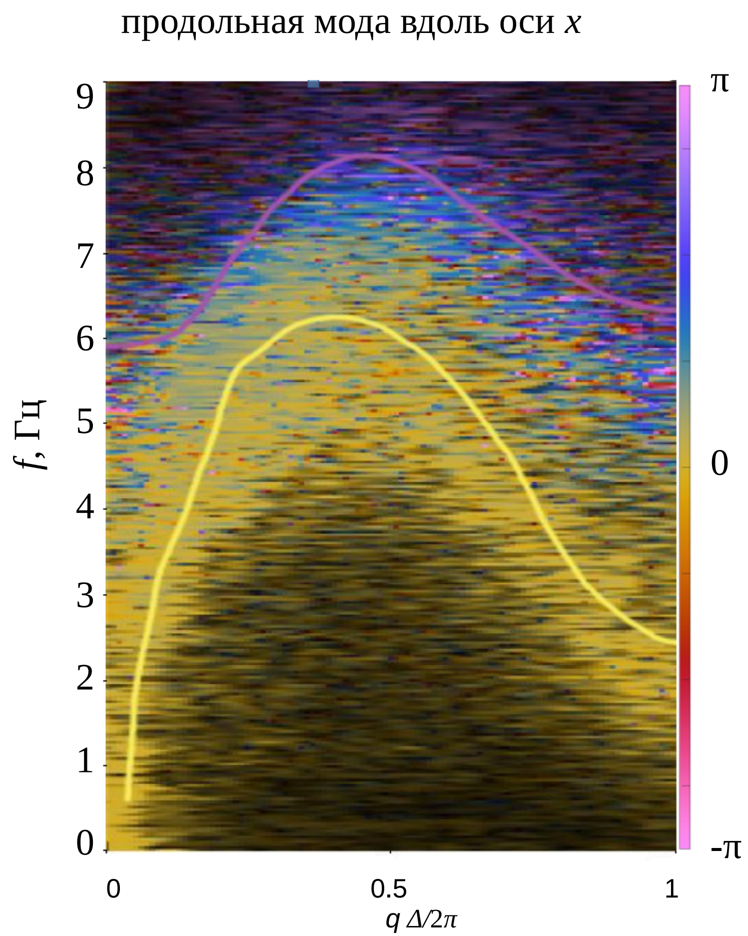
продольная мода вдоль оси *x* поперечная мода вдоль оси *x*

верхний слой

нижний слой



Сдвиг фаз между слоями



Пересечение ветвей отсутствует

Сравнение с экспериментом

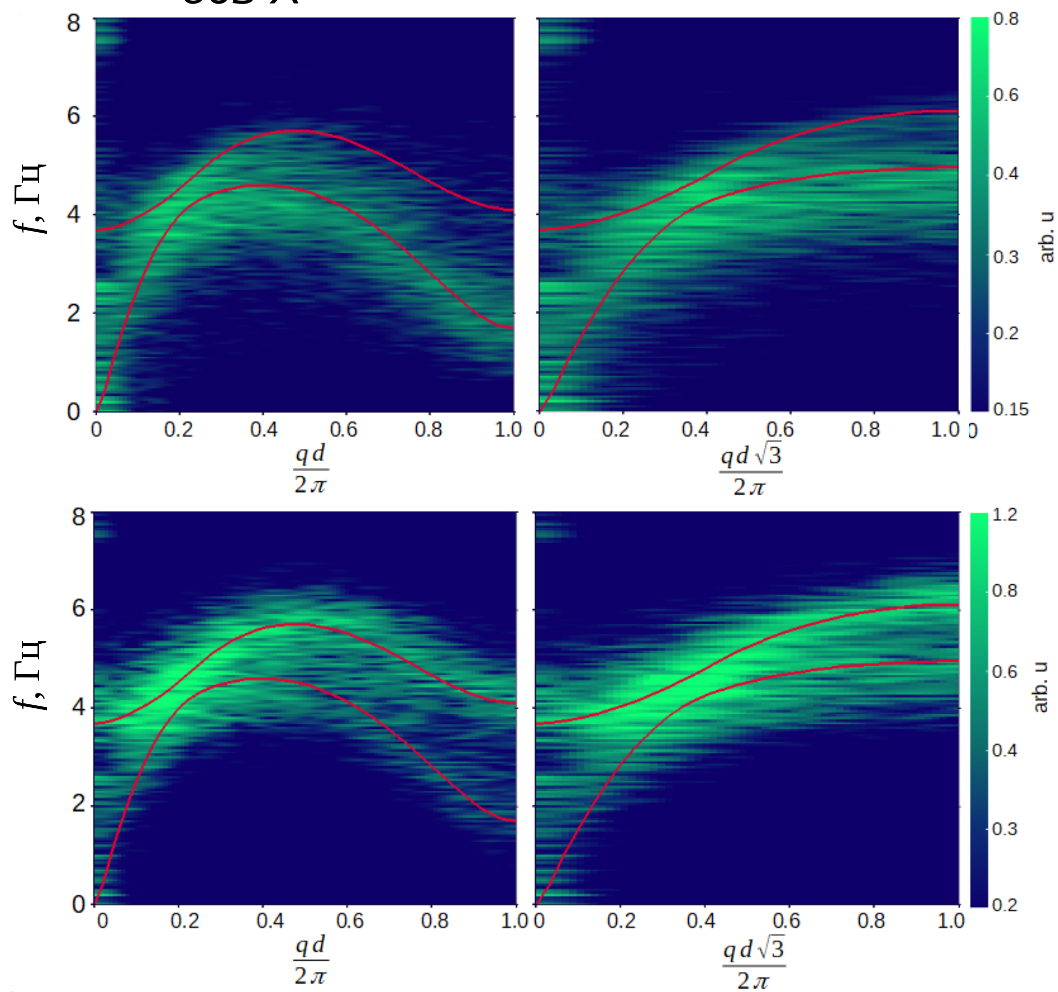
$Z_{7.2} = 8500$; $Z_{10.4} = 16100$; $\theta_w = 550$ с$^{-2}$

Продольные моды

ось X *ось Y*

верхний слой

нижний слой



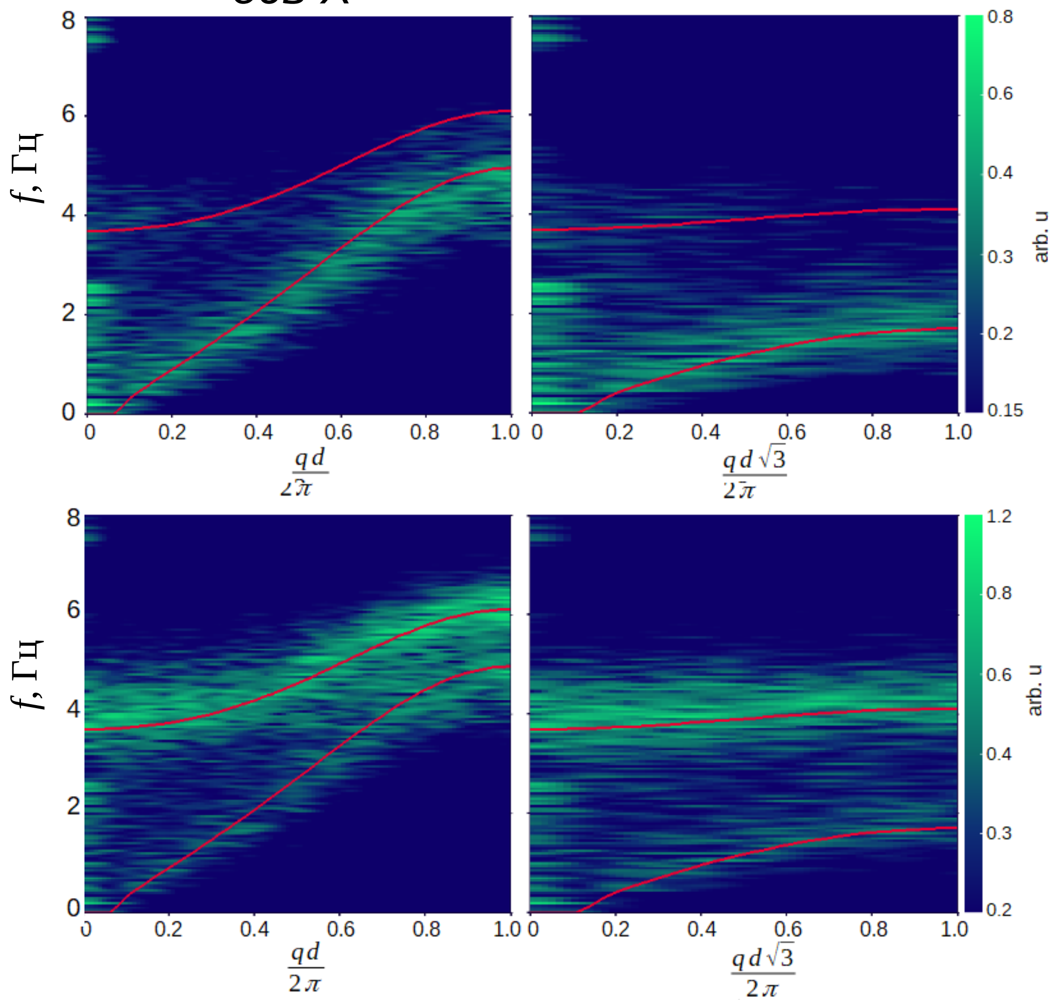
Сравнение с экспериментом

Поперечные моды

ось X ось Y

верхний слой

нижний слой



Выводы

- Получена и исследована хорошо упорядоченная квази-двумерная структура из вертикально выстроенных пар микрочастиц двух размеров.
- Относительные интенсивности спектров колебаний верхнего и нижнего слоёв частиц демонстрируют не взаимный характер взаимодействия частиц из разных слоёв.
- Спектры колебаний в плоскости структуры хорошо описываются моделью взаимодействия, включающую взаимодействие частиц с потенциалом Юкава и воздействие «вейка» под верхней частицей на расположенную непосредственно под ней частицу в нижнем слое.
- Определена частота горизонтальных колебаний частиц в «вейке», оказавшаяся 3.7±0.3 Гц.

Работа была поддержана грантом
РНФ № 20-12-00365