

# Исследование оптического излучения потока микрочастиц образующихся при выходе ударной волны на свободную поверхность металла

Кулиш М. И., Дудин С. В., Минцев В. Б.  
ФИЦ ПХФ и МХ, Черноголовка



**NPP 2022**  
**NON-IDEAL PLASMA PHYSICS**  
Annual Moscow Workshop

November 30 - December 1, 2022, Moscow, Russia

Выброс частиц со свободной поверхности образцов при выходе на нее ударной волны был обнаружен в 50-е годы и исследован сотрудниками ВНИИЭФ С. Б. Кормером, Ф. В. Григорьевым, А. П. Толочко, В. А. Голубевым и др. Однако полученные результаты не публиковались в открытой печати.

Образцы металлов нагружались ударом пластины до давлений  $\approx 70$  ГПа. Применялись фотохнографическая методика и импульсная рентгенография.

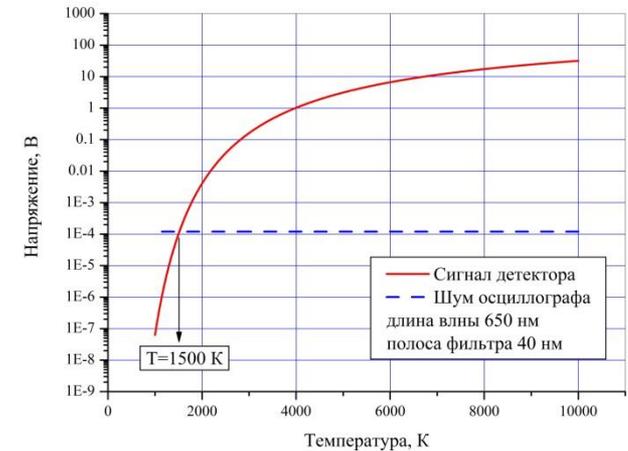
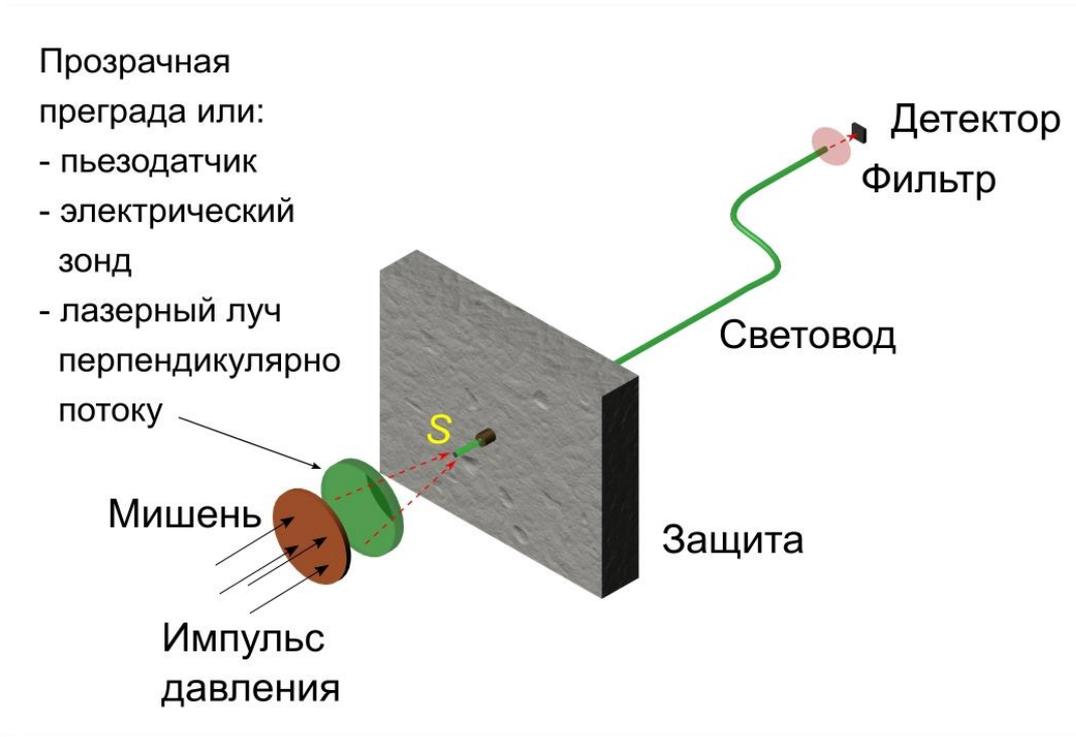
Перед взаимодействием воздушной ударной волны с прозрачной отсечкой в ряде случаев регистрировали неоднородное и слабое свечение, что связывали с наличием частиц, выброшенных с поверхности образца.

В. С. Трофимов и др., 1972

J. R. Asay et al, 1976

# Постановка эксперимента

## Ограничение измеряемой температуры снизу



$$V = S \cdot U(\lambda, T) \cdot d\lambda \cdot R$$

$S$  – площадь световода  $0.12 \text{ мм}^2$

$U(\lambda, T)$  – функция Планка

$d\lambda$  – полоса фильтра 40 нм

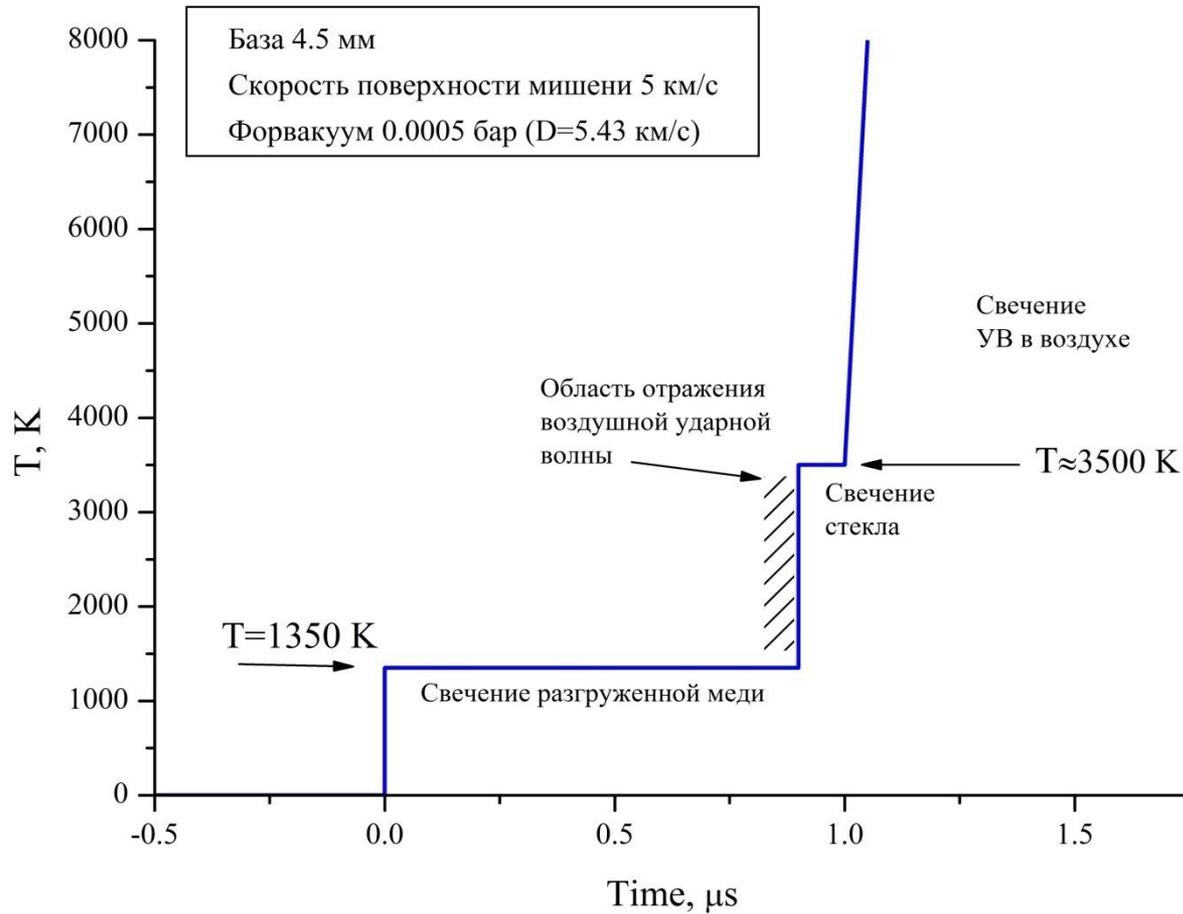
$R$  – резистор нагрузки 50 Ом

- материал мишени: металл
- давление ударного сжатия:  $\sim 100 \text{ ГПа}$
- база разлета :  $\sim 5 \text{ мм}$

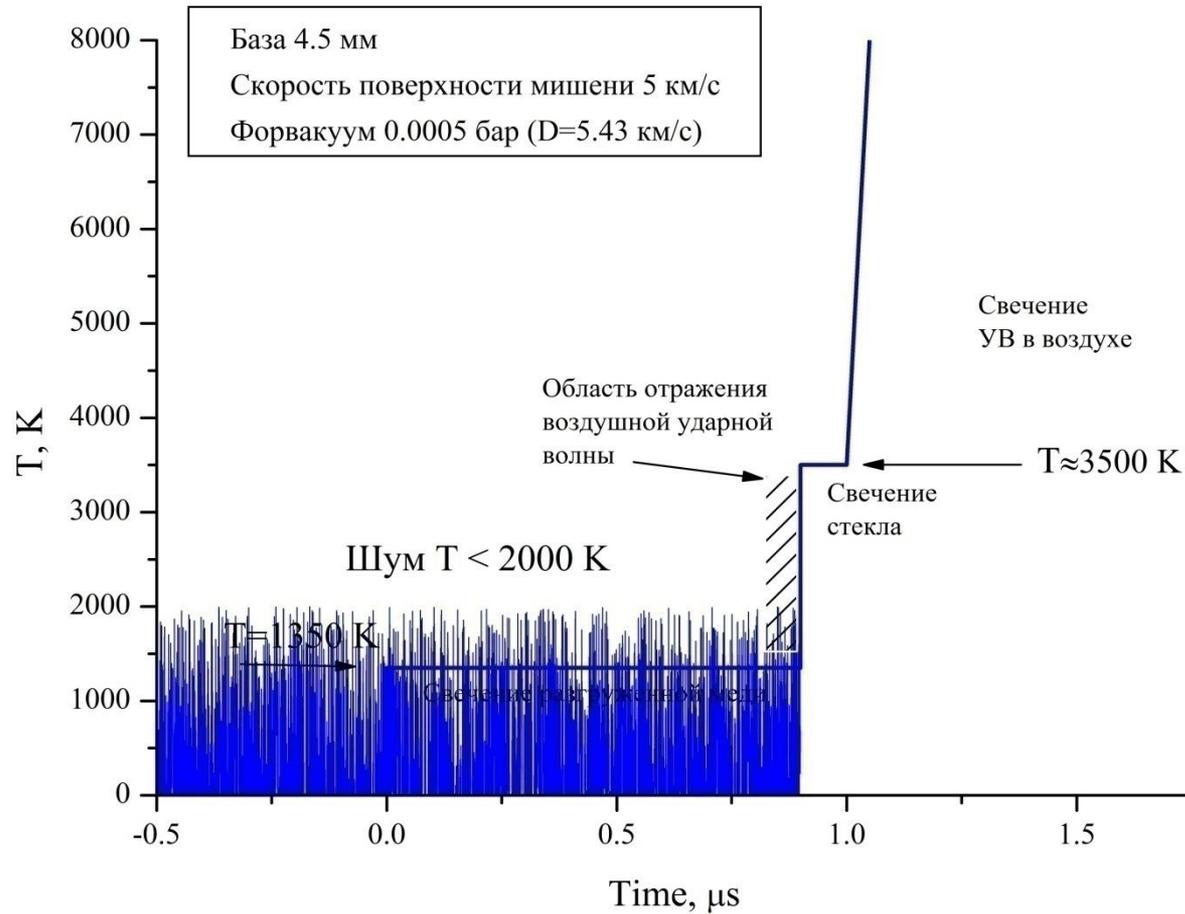
Шум резистора  $R$ :

$V_{ш}^2 = 4kTR \cdot \Delta f$  - половина от входного шума осциллографа

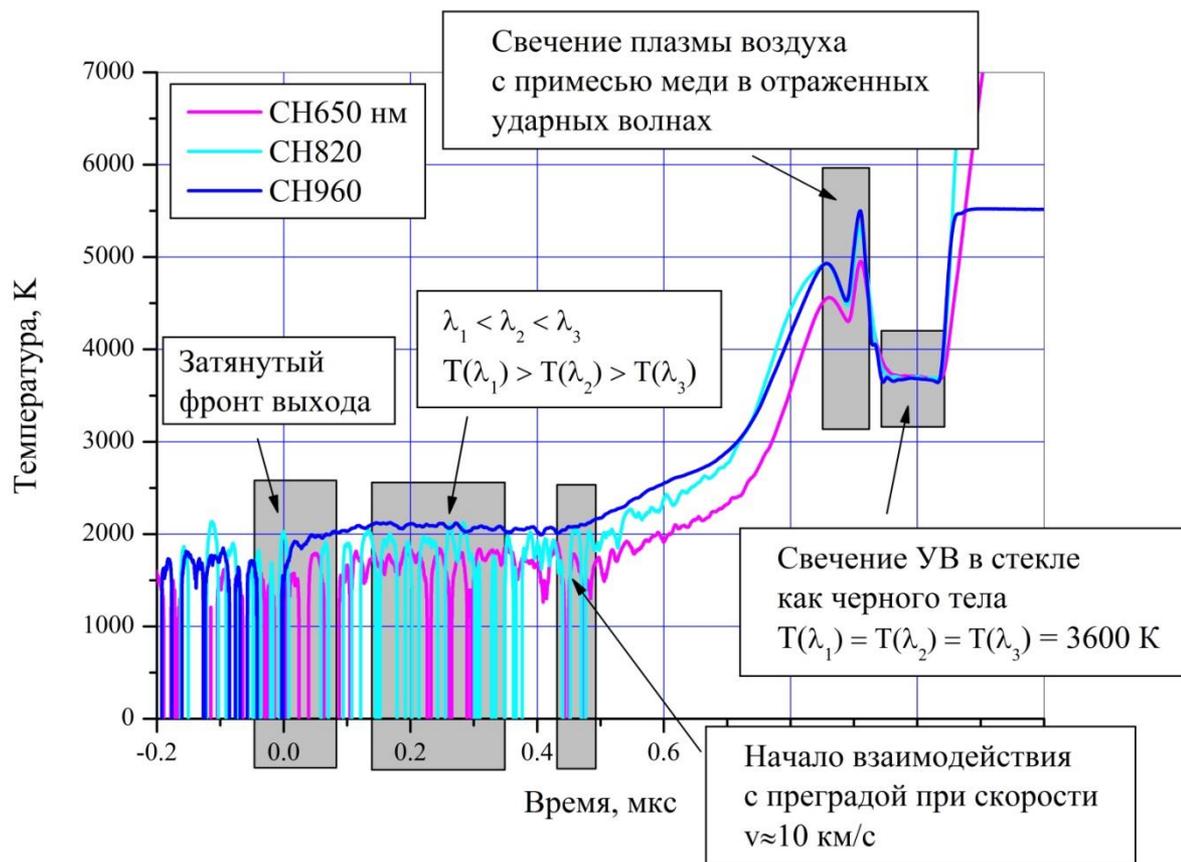
# Расчетная температура



# Расчетная температура + шум



# Результат измерения температуры для трех спектральных каналов



# Максимальная скорость

*Максимальная скорость сплошной кумулятивной струи:*

$$V = c_0 + \sqrt{c_0^2 + U^2}$$

$$c_0 = 3.95 \text{ км/с}$$

$$U = 5 \text{ км/с}$$

$$V = 10.3 \text{ км/с}$$

---

*Кинеловский, С. А., & Тришин, Ю. А. (1980). Физические аспекты кумуляции. Физика горения и взрыва, 16(5), 26-40.*

- При малых углах схождения наблюдается фазовый взрыв внутренних сильно нагретых слоев облицовки и образование за счет парообразной компоненты фазового взрыва высокоскоростных кумулятивных струй, температура которых по спектрометрическим измерениям превышает 6000 К.

- Выброс частиц возникает в широком диапазоне давлений ударного сжатия (J.R. Asay, L.P. Mix, F.C. Perry, Appl. Phys. Lett. 29, 284, 1976)

# Схема обработки экспериментальных сигналов

В эксперименте измерялась величина сигнала, описываемая выражением:

$$V_e(\lambda, t) = C(\lambda) \cdot U(\lambda, T(t))$$

$C(\lambda)$  – определяется при калибровке,  $V_e(\lambda, t)$  – экспериментальный сигнал.

Для излучения частиц:

$$V_p(\lambda, t) = \alpha \cdot C(\lambda) \cdot U(\lambda, T_p(t))$$

$\alpha < 1$  – удельная площадь частиц в поле зрения прибора.

Из выражений следует уменьшение яркостной температуры с ростом длины волны.

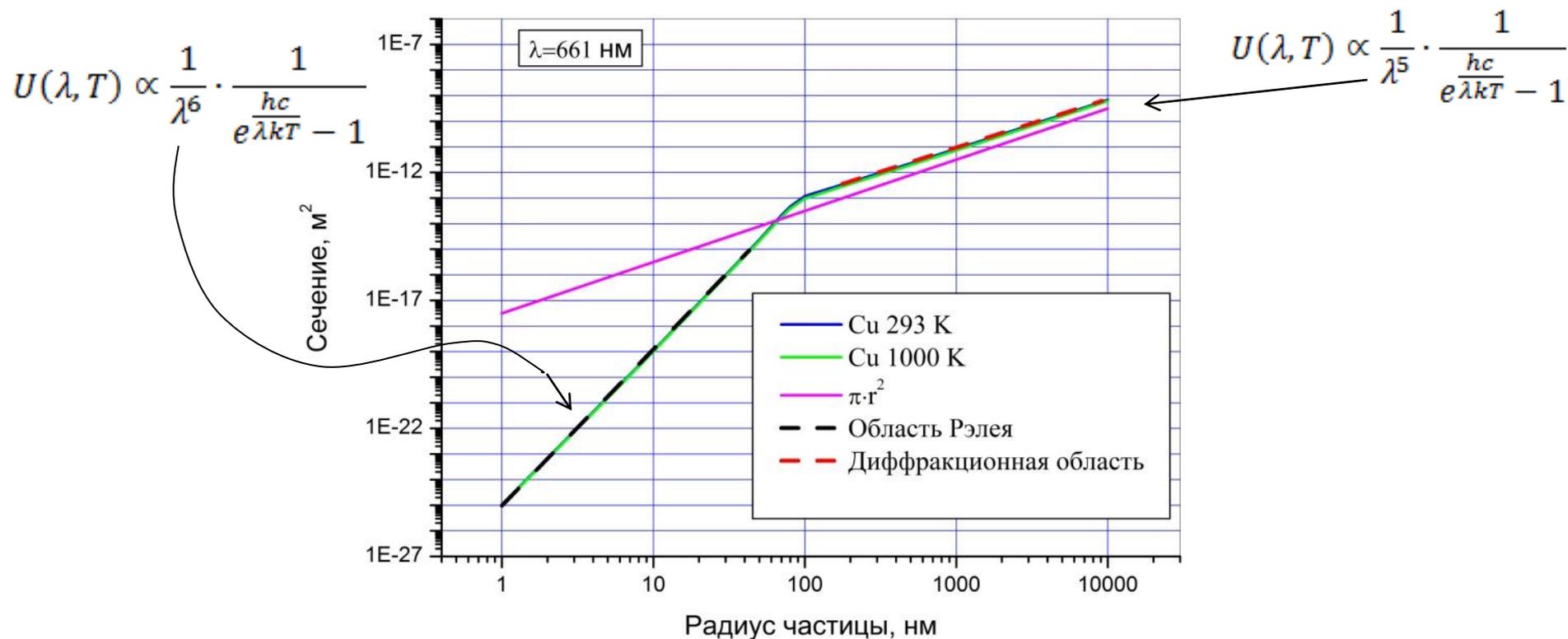
Величины  $\alpha$  и  $T_p(t)$  могут быть определены решением уравнения:

$$\sum_i \left[ \frac{V_p(\lambda_i, t)}{C(\lambda_i)} - \alpha \cdot U(\lambda_i, T_p(t)) \right]^2 \rightarrow \min$$

Выражение определяет цветовую температуру частиц.

Для полного описания излучения ансамбля частиц следует учесть зависимость удельной площади частиц от длины волны, от размера частицы, и от функции распределения частиц по размерам -  $\alpha(\lambda, f(r))$

# Сечение поглощения



Полное сечение поглощения медных частиц в зависимости от радиуса для двух температур меди

# Равновесное излучение сферических частиц металла

Частица находится в равновесии с излучением если она поглощает и излучает спектральную мощность:

$$P = 4\pi\sigma(\nu) \cdot E = \sigma(\nu) \cdot \frac{8\pi h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

где  $\sigma(\nu)$  - сечение поглощения частицы.

По работе [Ландау, 1982] для сферической частицы объема  $V$ , можно применить следующее выражение для сечения частицы:

$$\sigma(\omega) = \frac{4\pi\omega}{c} (a_e'' + a_m'')V$$

В случае проводящих тел магнитная компонента преобладает [Martynenko, 2005]. Магнитная поляризуемость может быть записана как функция безразмерного параметра  $p=r/\delta$ , где  $\delta=c/(2\pi z\omega)^{1/2}$  - глубина проникновения поля в частицу. Величина  $z$  равна статической проводимости металла.

Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Том 8. Электродинамика сплошных сред // книга. : Наука, 1982.

Martynenko Y.V., Ognev L.I. Thermal radiation from nanoparticles // Technical physics. Springer, 2005. Vol. 50, № 11. P. 1522–1524.

# Приближение для сечения поглощения

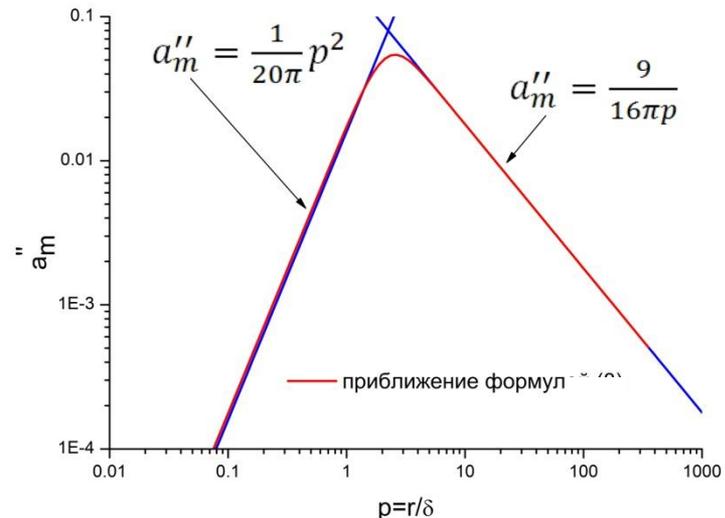
В случае  $p \ll 1$  и в случае  $p \gg 1$  выражения для магнитной поляризуемости записываются соответственно:

$$a''_m = \frac{1}{20\pi} p^2 = \frac{r^2 z \omega}{10c^2}, p \ll 1 \quad a''_m = \frac{9}{16\pi p} = \frac{9c}{16\pi r \sqrt{2\pi z \omega}}, p \gg 1$$

Для аппроксимации зависимостей во всем диапазоне частот в расчетах было применено следующее аналитическое выражение:

$$a''_m = \frac{9}{16\pi p} \cdot \frac{\sin^3\left(\frac{2p}{3}\right) - \sinh^3\left(\frac{2p}{3}\right)}{\cos^3\left(\frac{2p}{3}\right) - \cosh^3\left(\frac{2p}{3}\right)}$$

Магнитная  
поляризуемость для  
всего диапазона частот



# Плотность числа частиц как функция объема частицы

Функции распределения нано и микрочастиц по размерам изучались методами молекулярной динамики и экспериментально.

Для частиц радиусов  $\sim 10$  нм применимо приближенное выражение:

$$n(V)dV = \frac{C}{V^{1.8}}dV$$

$V$  – объем частицы,  $n(V)$  – плотность числа частиц,  $C$  – коэффициент.

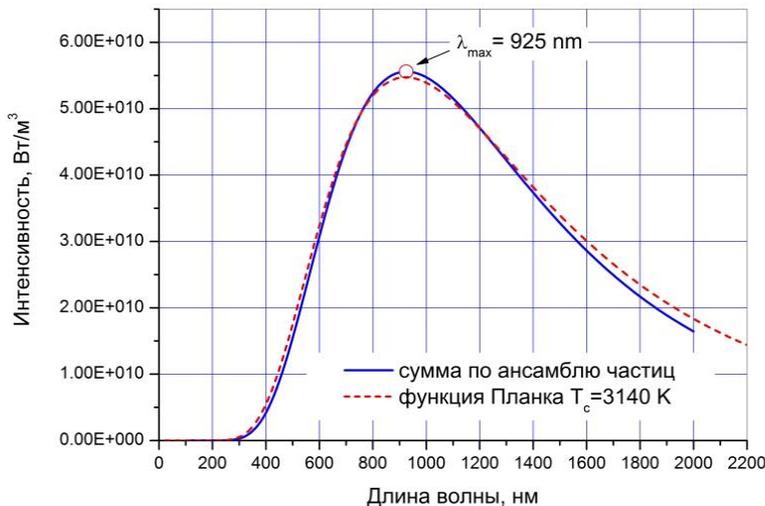
---

При известной зависимости плотности числа частиц от объема частицы и известной зависимости сечения поглощения от длины волны света и радиуса сферической частицы может быть проведен расчет излучения потока частиц

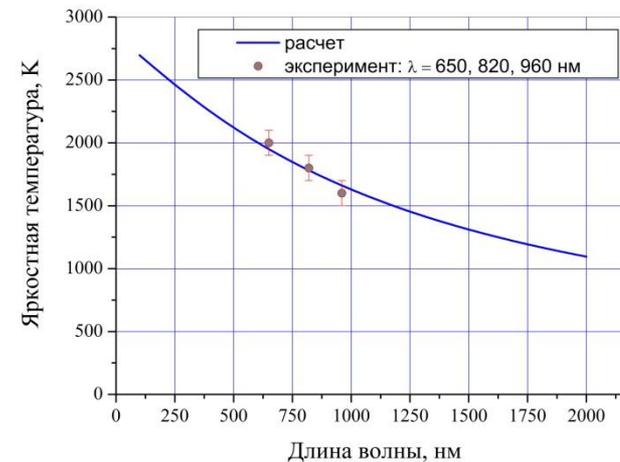
# Результат измерений

Экспериментально определенная цветовая температура частиц меди:  $T \approx 3200$  К.

При учете распределения частиц по размерам и, в основном, при учете зависимости сечения поглощения от длины волны, температура частиц меди определена как:  $T \approx 2800$  К, что близко к температуре кипения.



Рассчитанный спектр излучения ансамбля частиц меди.



Сравнение яркостной температуры ансамбля излучающих частиц с экспериментом.

# Выводы

- Выброс частиц при выходе ударной волны на поверхность наблюдается в широком диапазоне давлений ударного сжатия.
- Температура частиц больше температуры сплошного разгруженного вещества. При этом мощность излучения частиц много больше мощности излучения разгруженной мишени.
- Характерной особенностью излучения многих частиц или горячих точек при регистрации пирометром является уменьшение яркостной температуры с ростом длины волны излучения.
- При давлении ударного сжатия меди 160 ГПа, при скорости разлета мишени 5 км/с, скорость лидирующей группы частиц достигает 10 км/с, приближаясь к предельной скорости сплошной кумулятивной струи.
- Цветовая температура частиц 3200 К выше их температуры 2800 К, определенной с учетом сечения поглощения от длины волны.

Спасибо за внимание !