



**ВНИИМ**

ФГУП "Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И.Менделеева"

**Внедрение во ВНИИМ нового определения  
кельвина в диапазоне выше 961,78 °C**  
**Realization at VNIIM of a new definition of kelvin in the  
range above 961.78 °C**

[www.vniim.ru](http://www.vniim.ru)

*Докладчик:*

*к.т.н. ФУКСОВ В.М.  
Менделеева»*

*ФГУП «ВНИИМ им. Д.И.*



**ВНИИМ**

им. Д.И.Менделеева

## Определения кельвина

Определение кельвина, одобренное 13<sup>th</sup> CGPM meeting in 1967, Resolutions 3 and 4, имело следующую формулировку:

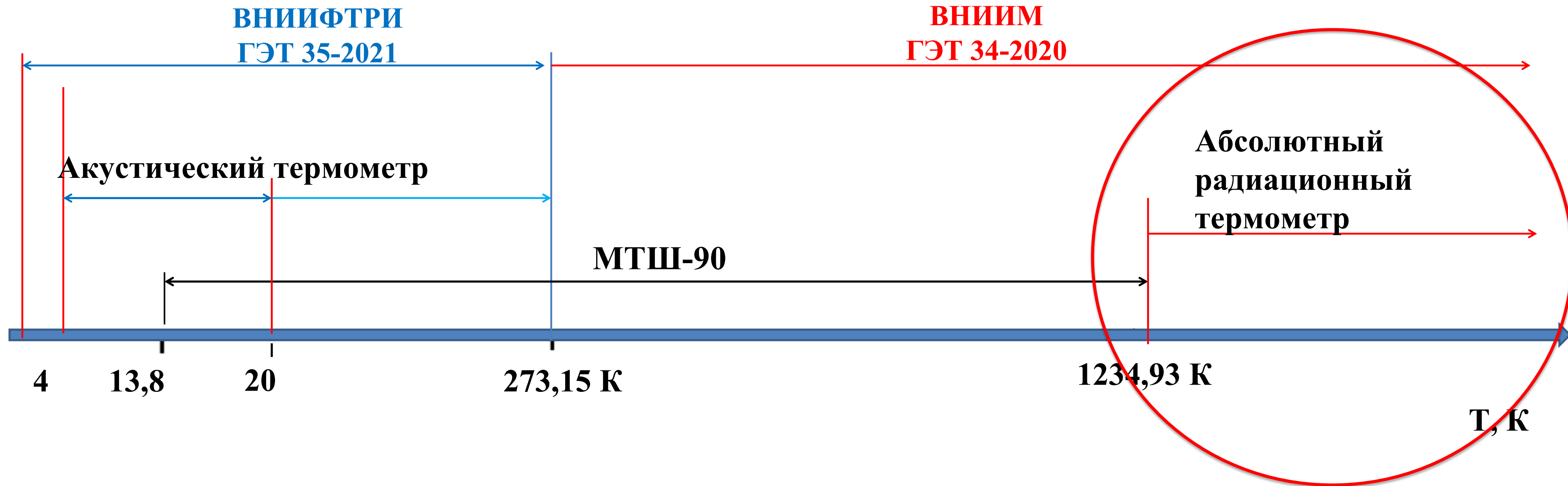
***КЕЛЬВИН**, символ  $K$ ., является единицей термодинамической температуры СИ.*

*Кельвин равен  $1/273,16$  части термодинамической температуры тройной точки воды.*

**В соответствии с решением 26-й Генеральной конференции по мерам и весам новое определение кельвина имеет следующую формулировку:**

*Кельвин, символ  $K$ , является единицей термодинамической температуры. Он определяется путем принятия фиксированного числового значения постоянной Больцмана  $k$  которое должно составлять  $1,380\ 649 \times 10^{-23}$  и которое выражено в единицах Дж  $K^{-1}$ , что эквивалентно  $кг\ м^2\ с^{-2}, K^{-1}$*

# Совершенствование первичных эталонов единицы температуры в соответствии с новым определением кельвина в диапазоне



## Реализация прямого метода измерения - измерение спектральной мощности излучения абсолютно черного тела, прослеживаемого к единицам СИ.

Спектральная плотность яркости (спектральная яркость),  $L_{b,\lambda}$ , представляет собой мощность, излучаемую черным телом в единице телесного угла на интервале длины волны  $d\lambda$ , и описывается законом Планка:

$$L_{b,\lambda}(\lambda, T)d\lambda = \varepsilon(\lambda, T) \cdot \left( \frac{2hc^2}{n^2\lambda^5} \right) \cdot \frac{d\lambda}{\exp(hc/n\lambda kT) - 1}$$

где:

k – постоянная Больцмана;

h – постоянная Планка;

c – скорость света;

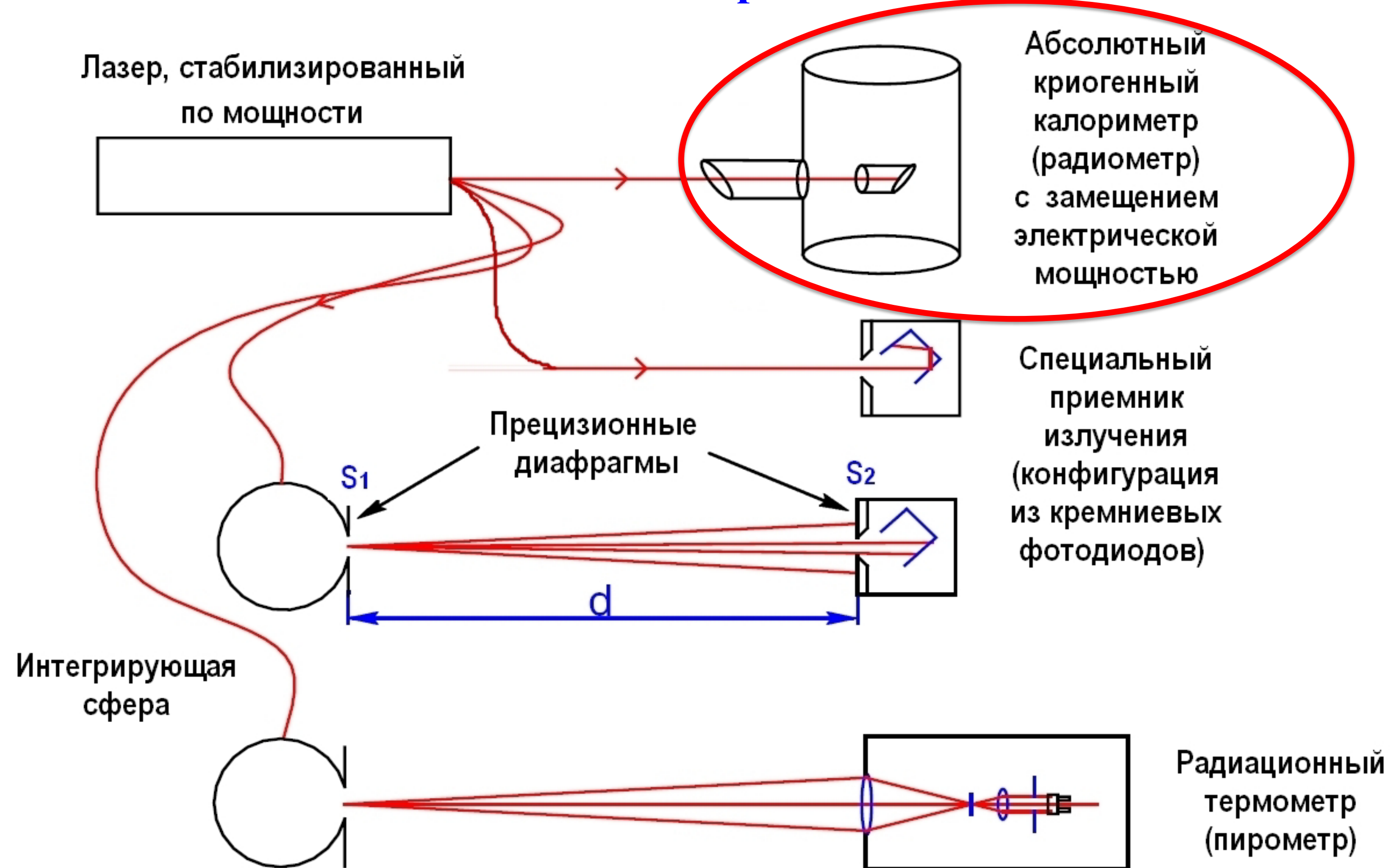
n - показатель преломления газа в оптической оси;

$\lambda$  - длина волны в газе;

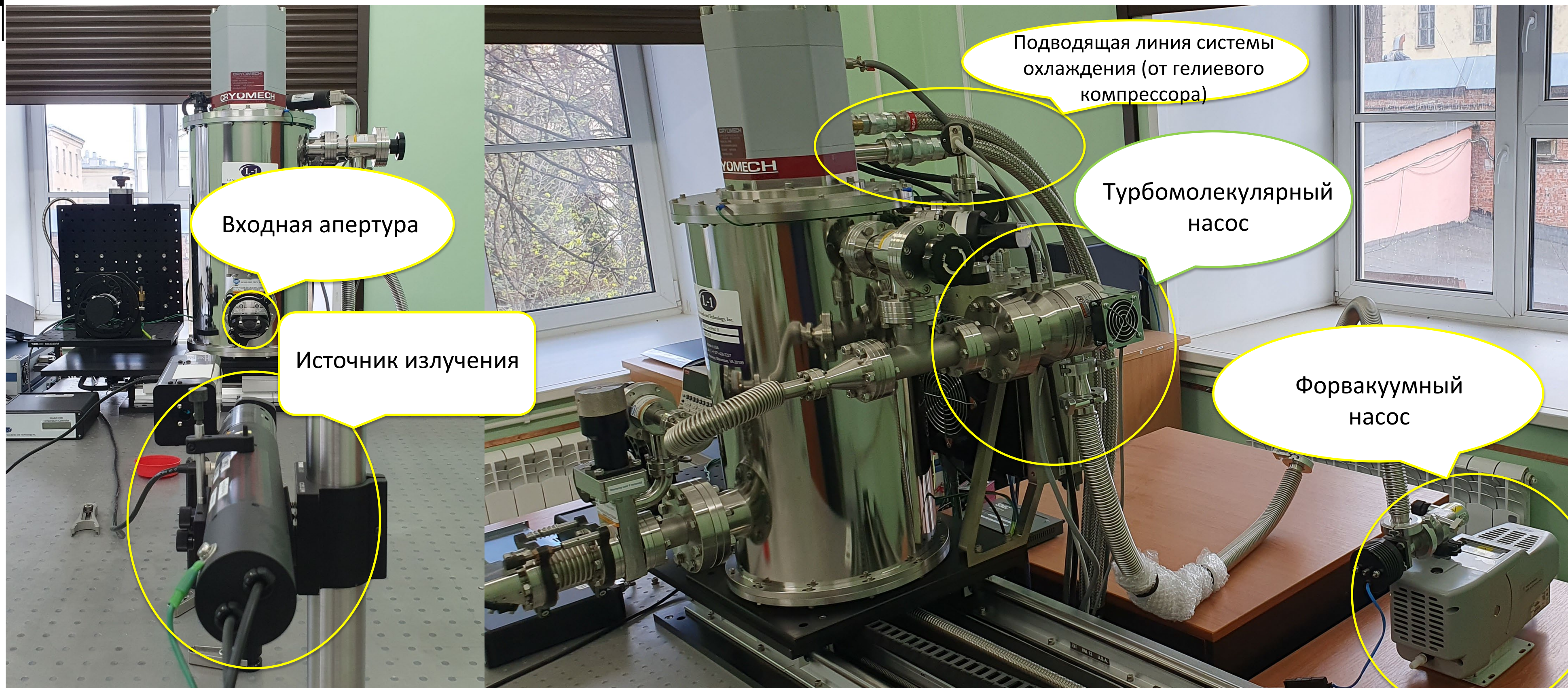
$\varepsilon(\lambda, T)$  – излучательная способность (коэффициент черноты);

T – термодинамическая температура.

# Воспроизведение и передача единицы температуры по тепловому излучению прямым методом



# Аппаратура для измерения мощности теплового излучения на основе криогенного радиометра (реализация прямого метода)



# Аппаратура для измерения мощности теплового излучения на основе криогенного радиометра (реализация прямого метода)

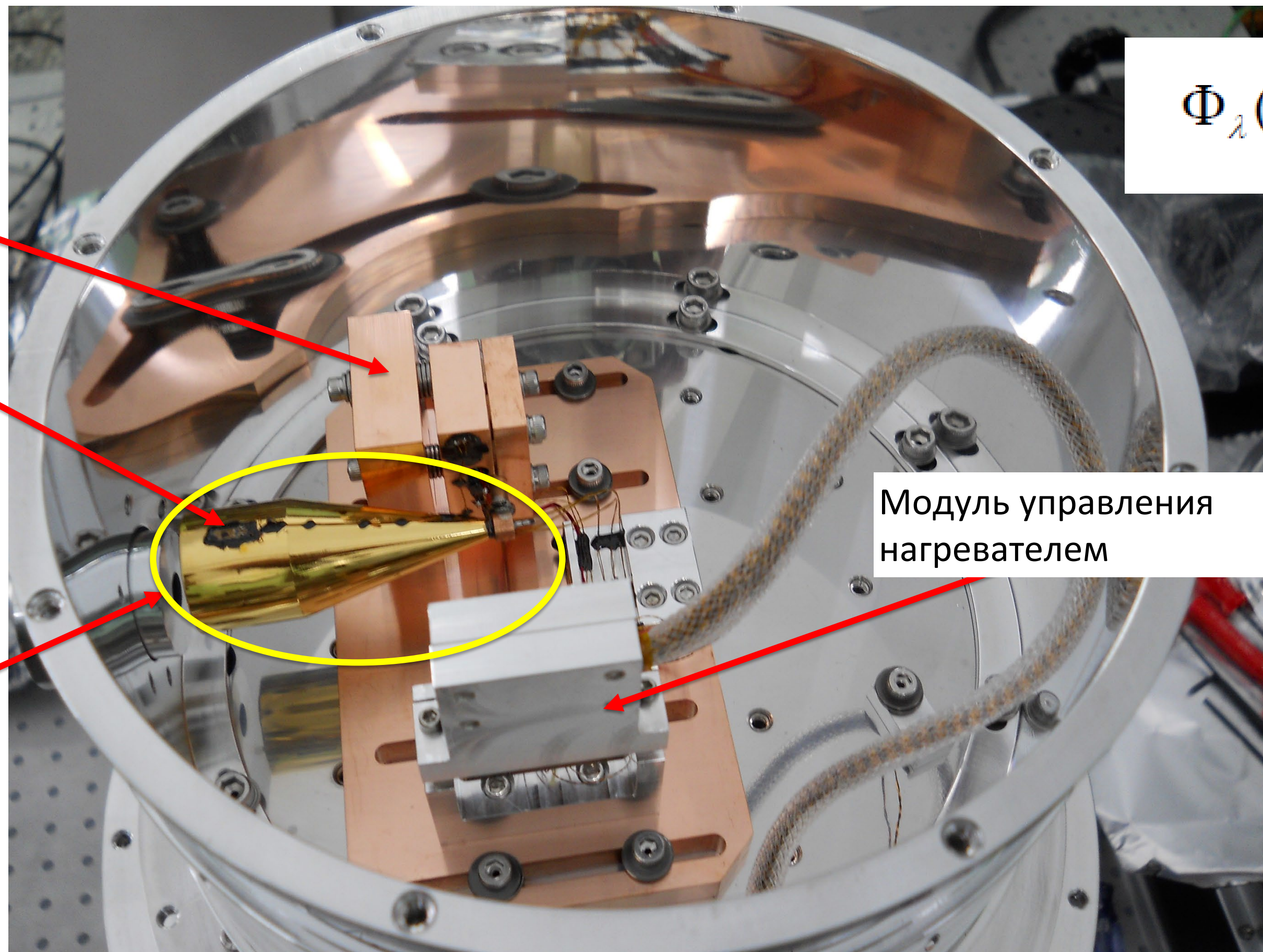
$$\Phi_{\lambda}(\lambda) = \Theta L_{\lambda}(\lambda) = I \cdot U$$

Юстировочный узел

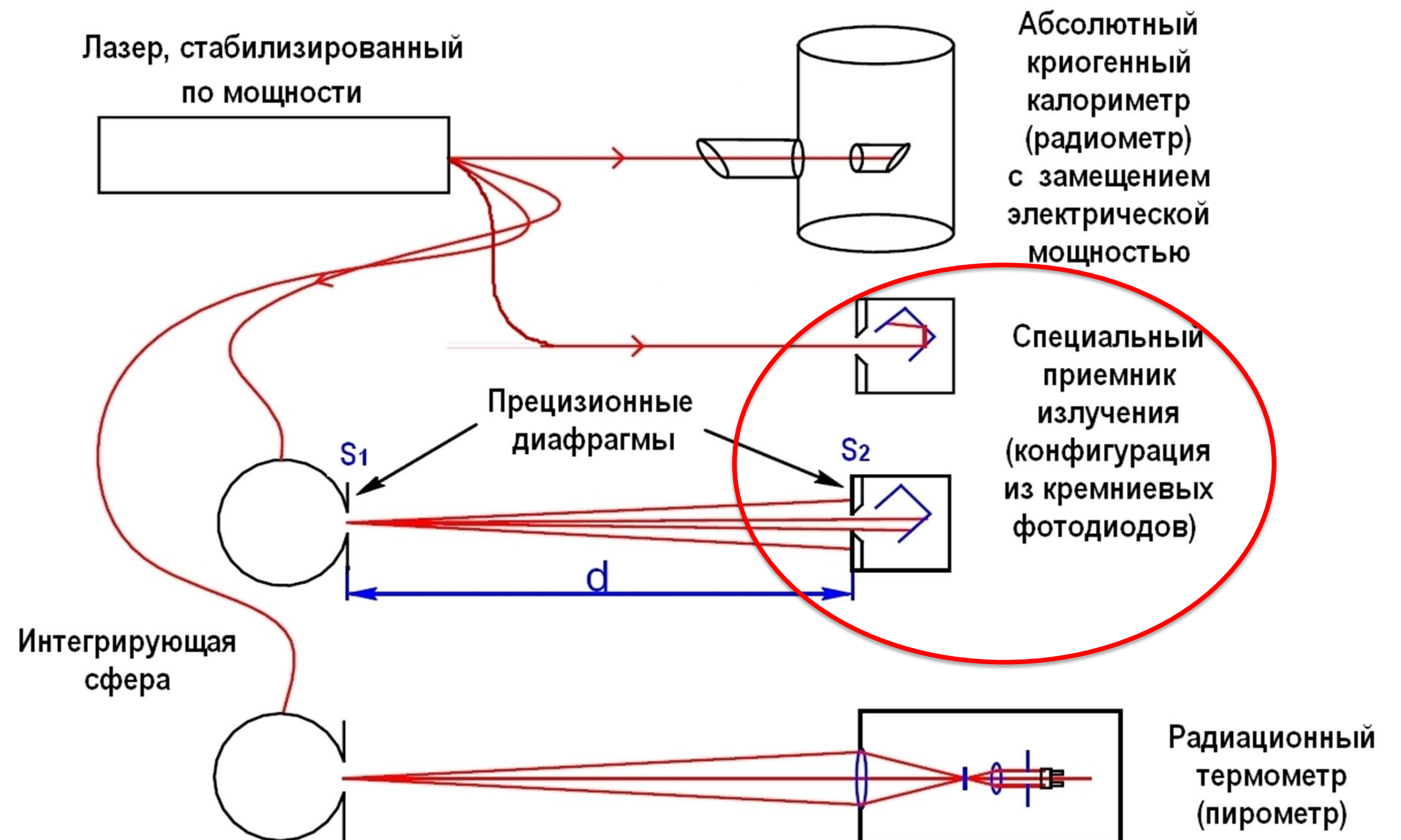
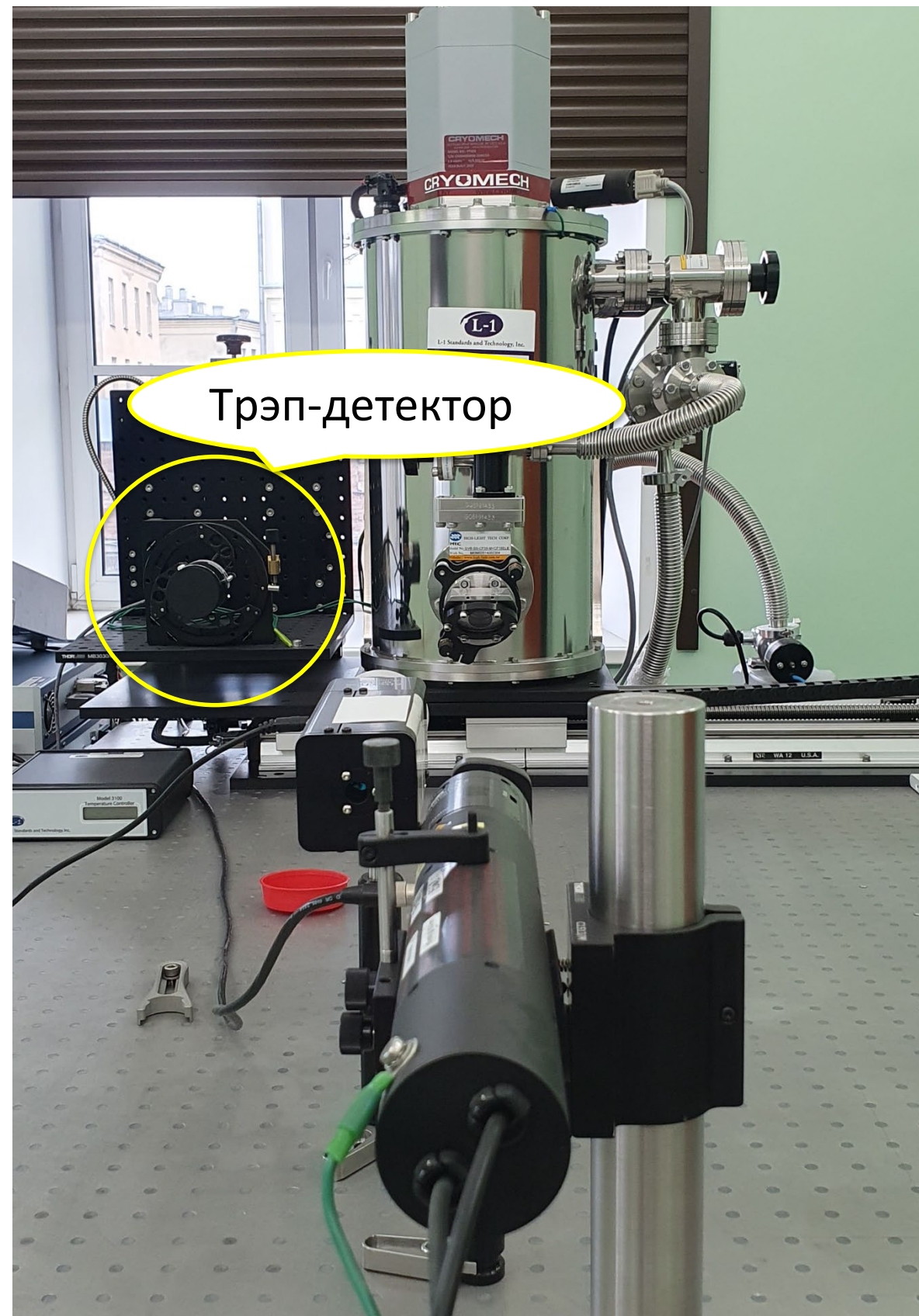
Термометр

Входное отверстие  
детектора

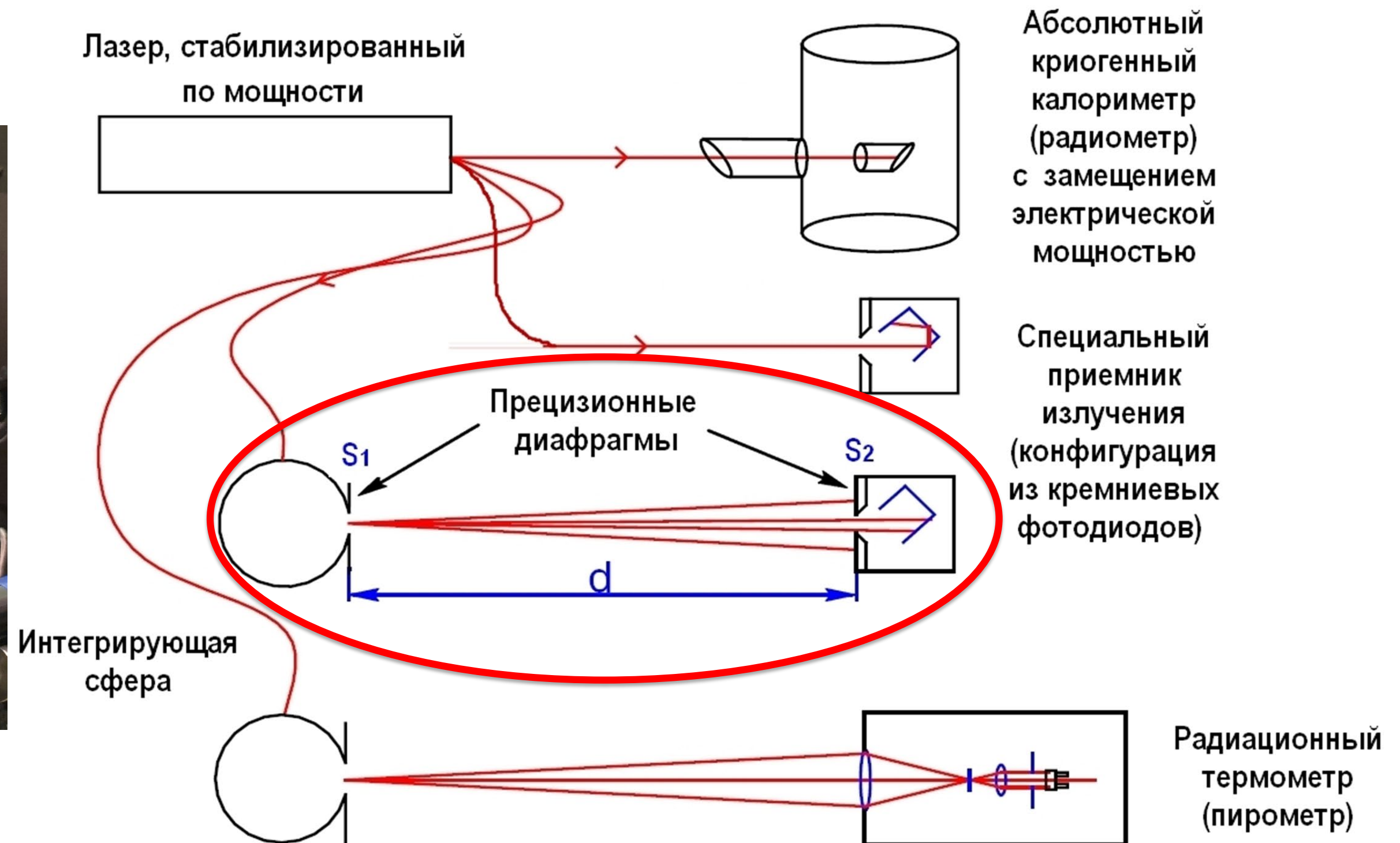
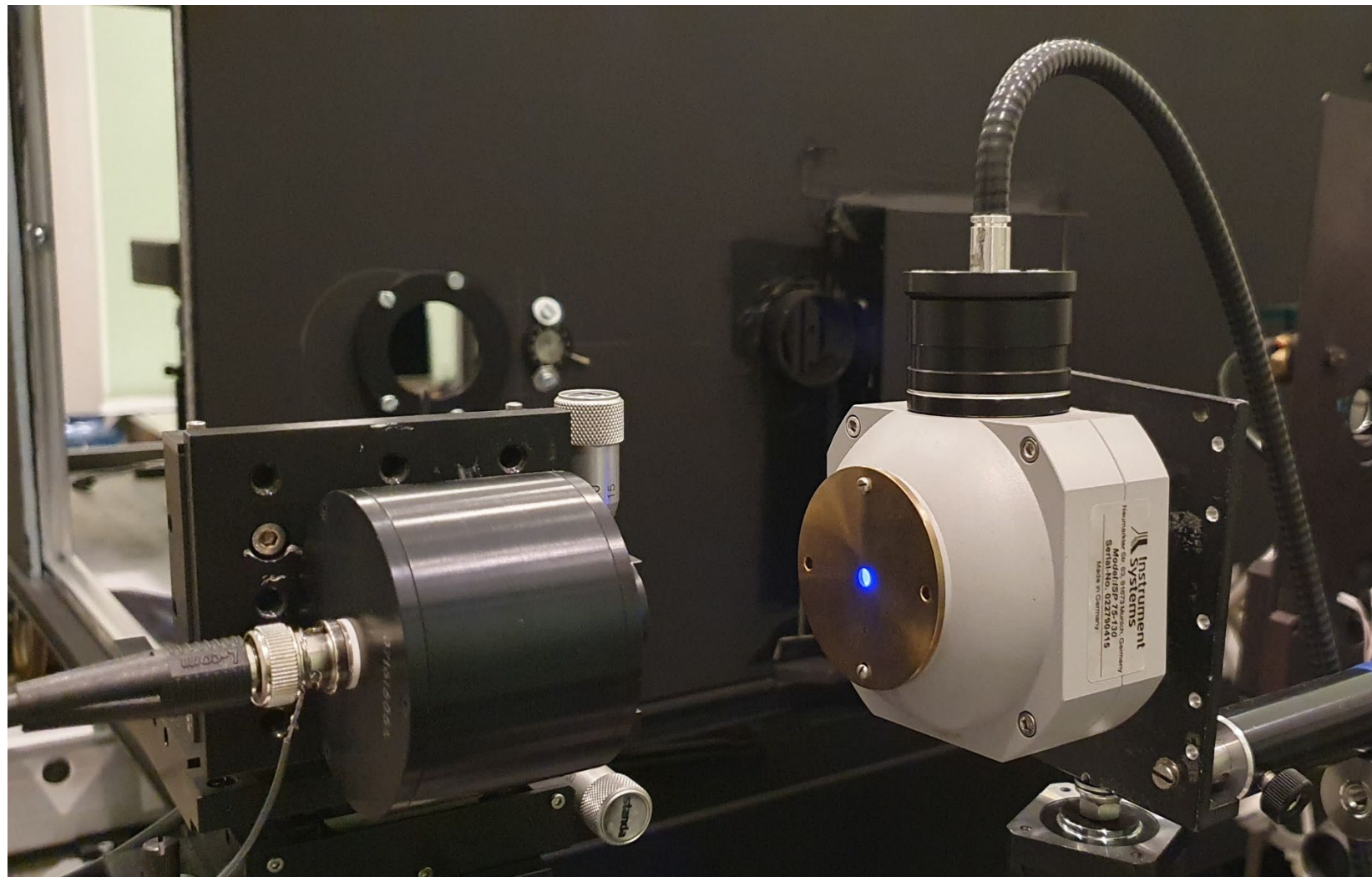
Модуль управления  
нагревателем



# Передача единицы мощности от криогенного радиометра трэп-детектору



# Передача единицы мощности от трэп-детектора на источник излучения (интегрирующую сферу)



# Передача единицы мощности от трэп-детектора на источник излучения (интегрирующую сферу)

## Расчет термодинамической температуры

$$L_{\lambda} = \frac{I_{\text{ЭДИ}}}{S_{L\lambda}} = K_s \cdot \frac{I_{\text{ЭДИ}}}{\pi \cdot g \cdot S_{\Phi\lambda}},$$

$I_{\text{ЭДИ}}$  – выходной ток трэп-детектора при освещении излучением интегрирующей сферы через диафрагмы;

$S_{L\lambda}$  – спектральная чувствительность ЭДИ к яркости излучения;  $S_{L\lambda} = \pi \cdot g \cdot S_{\Phi\lambda}$ ;

$S_{\Phi\lambda}$  – спектральная чувствительность ЭДИ к мощности,

$g$  – геометрический фактор, рассчитываемый по формуле

$$g = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{(r_1^2 + r_2^2 + d^2) + \sqrt{(r_1^2 + r_2^2 + d^2)^2 - 4 \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}},$$

$r_1$  и  $r_2$  – радиусы диафрагм, установленных на интегрирующей сфере и трэп-детекторе;

$d$  – расстояние между диафрагмами.

# Передача единицы мощности от трэп-детектора на источник излучения (интегрирующую сферу)

## Расчет термодинамической температуры

Итерационный алгоритм Ньютона-Рафсона:

$$T_{i+1} = T_i + \frac{I - K \cdot \int_0^\infty s_L(\lambda) \cdot L_b(\lambda, T) d\lambda}{\frac{c_2}{T_i^2} \cdot K \cdot \int_0^\infty s_L(\lambda) \cdot \frac{L_b(\lambda, T)}{n \cdot \lambda [1 - \exp(-\frac{c_2}{n \cdot \lambda \cdot T_i})]} d\lambda} = T_i + \frac{I \cdot K_s - \int_0^\infty s_L(\lambda) \cdot L_b(\lambda, T) d\lambda}{\frac{c_2}{T_i^2} \cdot \int_0^\infty s_L(\lambda) \cdot \frac{L_b(\lambda, T)}{n \cdot \lambda [1 - \exp(-\frac{c_2}{n \cdot \lambda \cdot T_i})]} d\lambda}$$

$K_s = 1/K$  – коэффициент, включающий в себя все оптические и прочие поправки, возникающие из-за различных влияющих факторов при измерении сигнала от трэп-детектора.

$S\phi(\lambda)$  – спектральная чувствительность приёмника к потоку, определяемая с помощью абсолютного криогенного радиометра;

$n$  – показатель преломления воздуха;

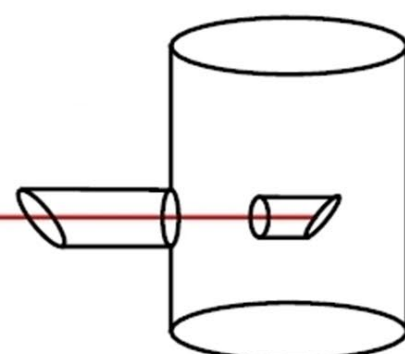
$\lambda$  – длина волны излучения, определяемая используемыми фильтрами;

$d\lambda$  ( $\Delta\lambda$ ) – ширина полосы пропускания фильтра (интегрирования по длине волны)

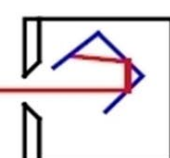
$$L_b(\lambda, T) = \left( \frac{2hc^2}{n^2 \lambda^5} \right) \cdot \frac{1}{\exp\left[ \frac{hc}{n\lambda kT} \right] - 1}$$

# Передача единицы термодинамической температуры на спектрокомпаратор (пирометр)

Лазер, стабилизированный по мощности



Абсолютный криогенный калориметр (радиометр) с замещением электрической мощностью



Специальный приемник излучения (конфигурация из кремниевых фотодиодов)

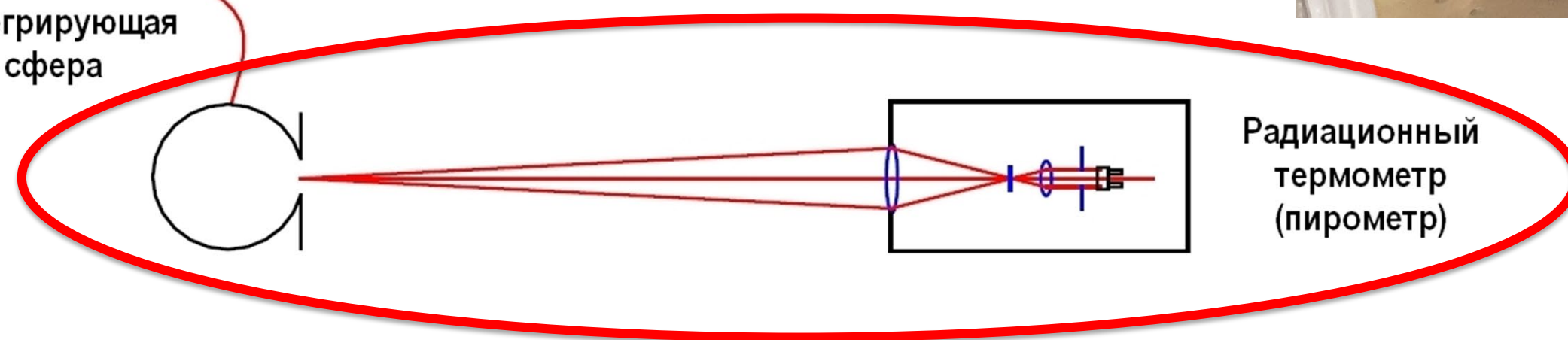
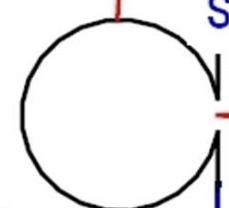
Прецизионные диафрагмы

S<sub>1</sub>

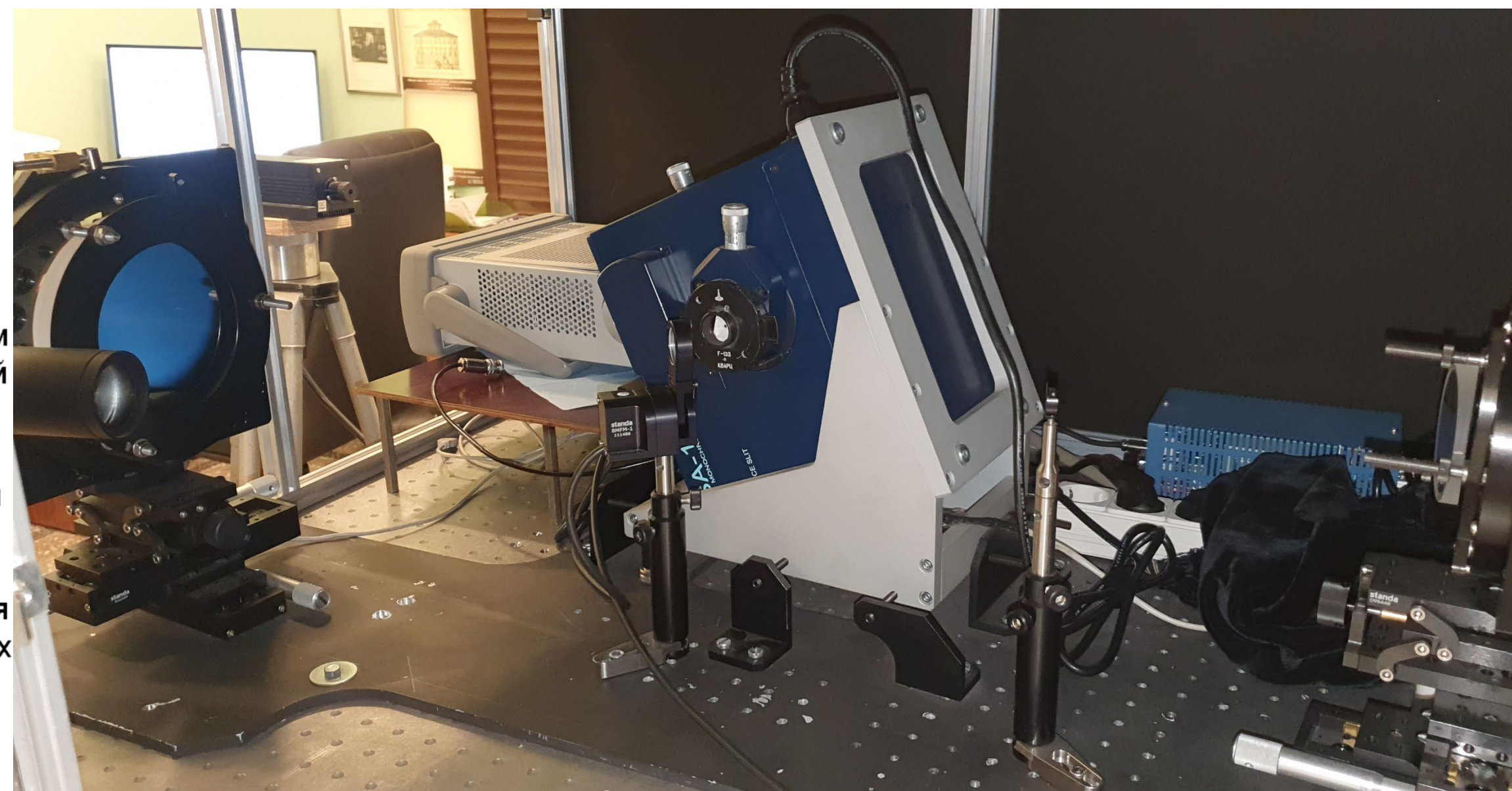
S<sub>2</sub>

d

Интегрирующая сфера



Радиационный термометр (пирометр)



# Составляющие неопределенности воспроизведения термодинамической температуры

Источник	Обозначение неопределенности	Тип
Воспроизводимость	$u_A$	A
Нелинейность трэп-детектора	$u_1$	B
Измерение силы тока пикоамперметром	$u_2$	B
Измерение темнового тока	$u_3$	B
Излучательная способность	$u_4$	B
ЭРИ и рассеянный свет	$u_5$	B
Пропускание фильтра	$u_6$	B
Определение диаметра диафрагм	$u_7$	B
Неламбертовость излучения сферы	$u_8$	B
Определение расстояния между диафрагмами	$u_9$	B
Непараллельность диафрагм	$u_{10}$	B
Неопределенность, связанная с определением спектральной чувствительности	$u_{11}$	B
Показатель преломления воздуха	$u_{12}$	B
Определение длины волны	$u_{13}$	B
Определение полосы спектра пропускания фильтра	$u_{14}$	B
Неопределенность, связанная с отличием излучения интегрирующей сферы от АЧТ (спектральное соотношение)	$u_{15}$	B

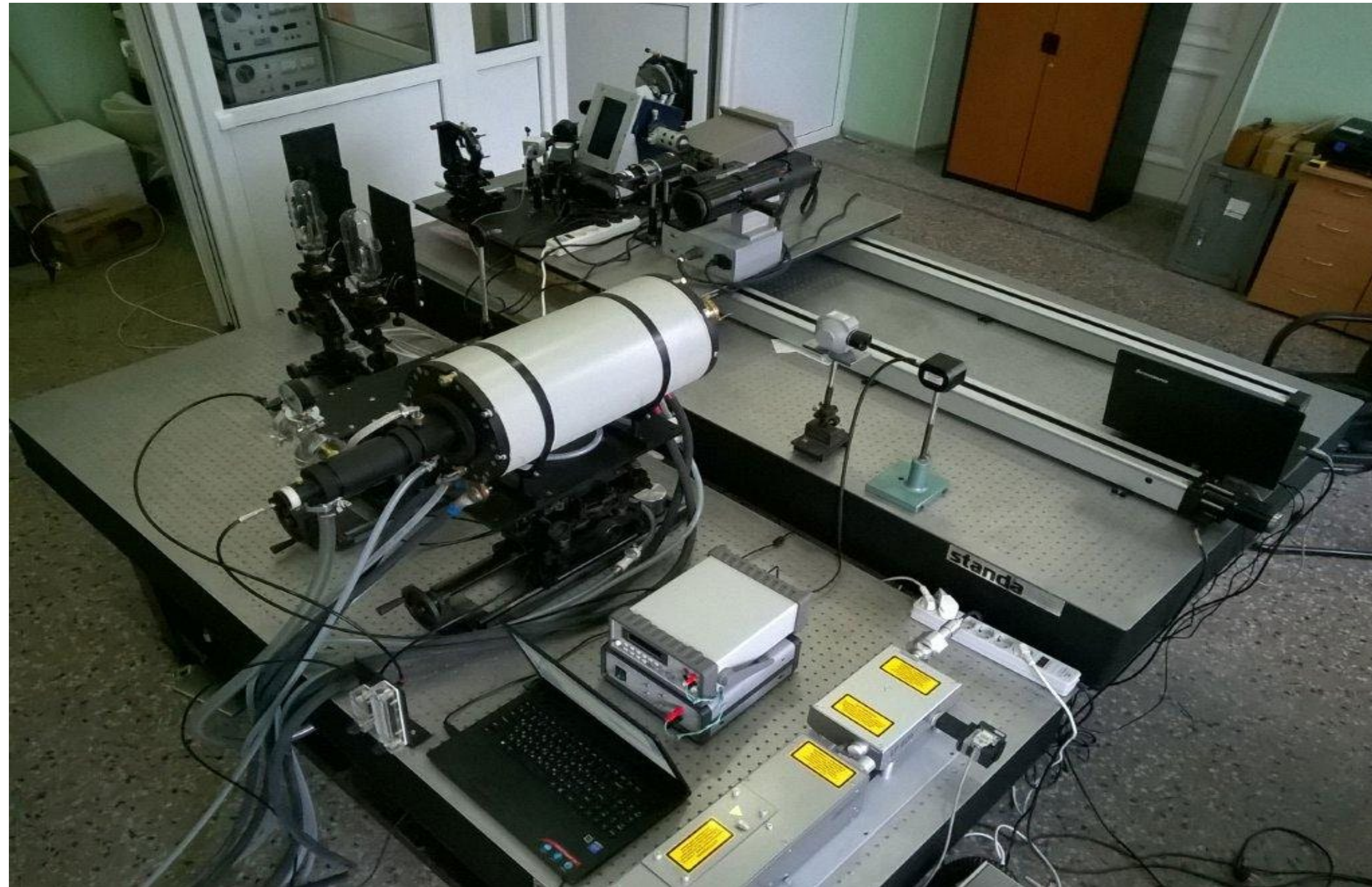
## Воспроизведение кельвина методом условной первичной термометрии

1. Метод предлагает использование высокотемпературных реперных точек на основе фазовых переходов эвтектик металл-углерод. Реперным точкам, используемым для реализации этого метода должны быть уже присвоены значения термодинамической температуры и неопределенность, имеющая место при реализации метода условной первичной термометрии.
2. Ожидается, что этот метод даст неопределенность, подобную (или немного выше), чем первичная радиометрия, но будет значительно легче осуществим.
3. Рассматриваются три варианта реализации метода условной первичной термометрии :
  - экстраполяция, основанная на одной реперной точке;
  - интерполяция между двумя или тремя реперными точками;
  - подбор методом наименьших квадратов, если больше чем три реперных точки используются.

.....

# Аппаратура для реализации фазовых переходов реперных точек

(реализация прямого и косвенного методов)



## Построение температурной шкалы на компараторе яркостей

$$T = \frac{\lambda}{c'_2} \cdot \ln \left[ \frac{I_{PT}}{I_{cp}} \cdot \left( e^{\frac{c'_2}{\lambda \cdot T_{PT}}} - 1 \right) + 1 \right], \quad \frac{L_b(\lambda, T)}{L_b(\lambda, T)} = \left( \frac{2hc^2}{n^2 \lambda^5} \right) \cdot \frac{1}{\exp\left[\frac{hc}{n\lambda kT}\right] - 1}$$

где:  $I_{PT}$  — ток фотодиода, вызванный потоком излучения от опорного источника;

$T_{PT}$  — эквивалент термодинамической температуры, соответствующий сигналу от опорного источника;

$c'_2$  — вторая радиационная константа закона Планка для излучения АЧТ; с учетом показателя преломления воздуха ( $n_\lambda = 1,00027$ )  $c'_2 = 14387,77/1,00027 = 14383,92$  мкм·К;

$\lambda$  — эффективная длина волны КСЯ;

$I_{cp}$  — среднее значение измеренного сигнала фотодиода КСЯ

**Ампулы с эвтектиками Co-C, Re-C и WC-C с температурами плавления 1324 °C, 2474 °C и 2749 °C соответственно (реализация косвенного метода)**





**ВНИИМ**

ФГУП "Всероссийский научно-  
исследовательский институт  
метрологии им. Д.И.Менделеева"

**СПАСИБО  
ЗА ВНИМАНИЕ!**

[www.vniim.ru](http://www.vniim.ru)



**ВНИИМ**

им. Д.И.Менделеева