

A1^{0.20} Измерьте фокусные расстояния f и F с помощью получения изображения A' на экране. Для измерения используйте $H \approx 1.20$ м. В листе ответов крестиком укажите соответствие между цветом линзы и названиями L_f и L_F .

Воспользуемся формулой тонкой линзы

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{H - a} = \frac{1}{f}$$

Для каждой линзы сделаем по два измерения.

Белая линза:

Ближняя фокусировка:

$$H = 124.2 \text{ см}, \quad a = 7.3 \text{ см} \quad \Rightarrow \quad f = 6.9 \text{ см}$$

Дальняя фокусировка:

$$H = 124.2 \text{ см}, \quad a = 116.5 \text{ см} \quad \Rightarrow \quad f = 7.2 \text{ см}$$

Синяя линза:

Ближняя фокусировка:

$$H = 124.5 \text{ см}, \quad a = 18.0 \text{ см} \quad \Rightarrow \quad F = 15.4 \text{ см}$$

Дальняя фокусировка:

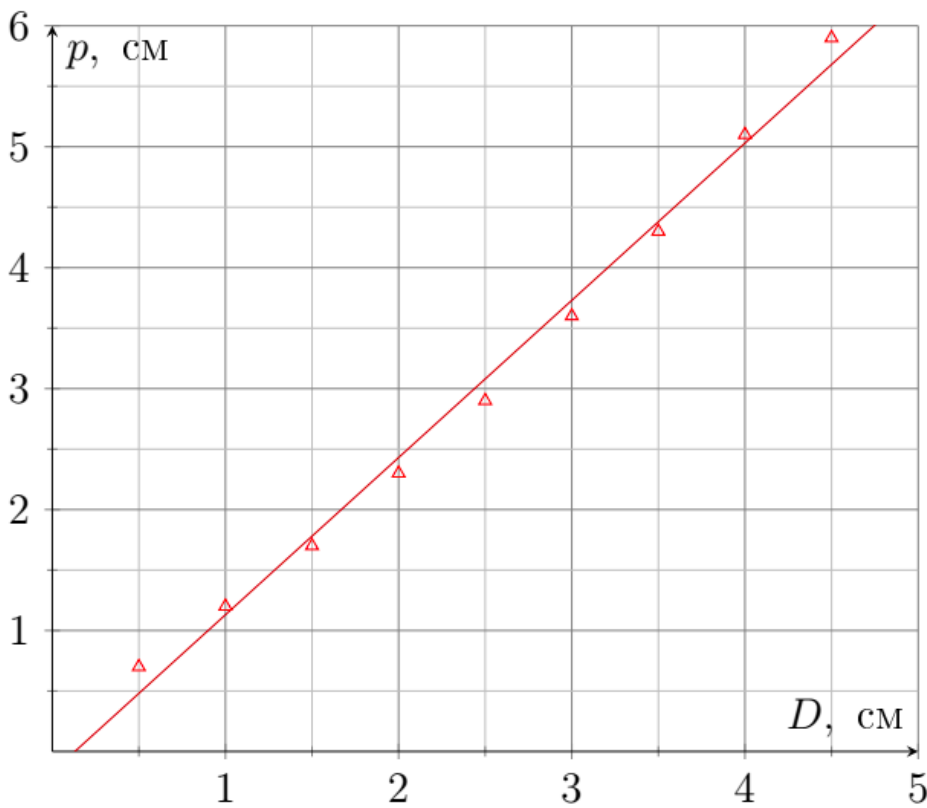
$$H = 124.2 \text{ см}, \quad a = 103.2 \text{ см} \quad \Rightarrow \quad F = 17.4 \text{ см}$$

B1^{0.20} Выставьте линзу так, что $a = a_0 + F/2$. В дальнейших пунктах мы будем изучать характерный размер таких изображений, поэтому выберите, какой линейный размер – высоту h или ширину w нечеткого изображения вы будете измерять в последующих пунктах. Обоснуйте свой выбор и крестиком обозначьте его в листе ответов. Этот размер будет обозначаться за p .

Нечеткость края пятна связана с линейным размером источника, поэтому будем измерять ширину.

B2^{0.45} Накройте часть линзы, обращенную к экрану, диафрагмой диаметра D . Для всех диафрагм измерьте размер изображения p .

B3^{0.40} Постройте график зависимости $p(D)$.



На графике видно слабую нелинейность у краев линзы – выпуклость вверх.

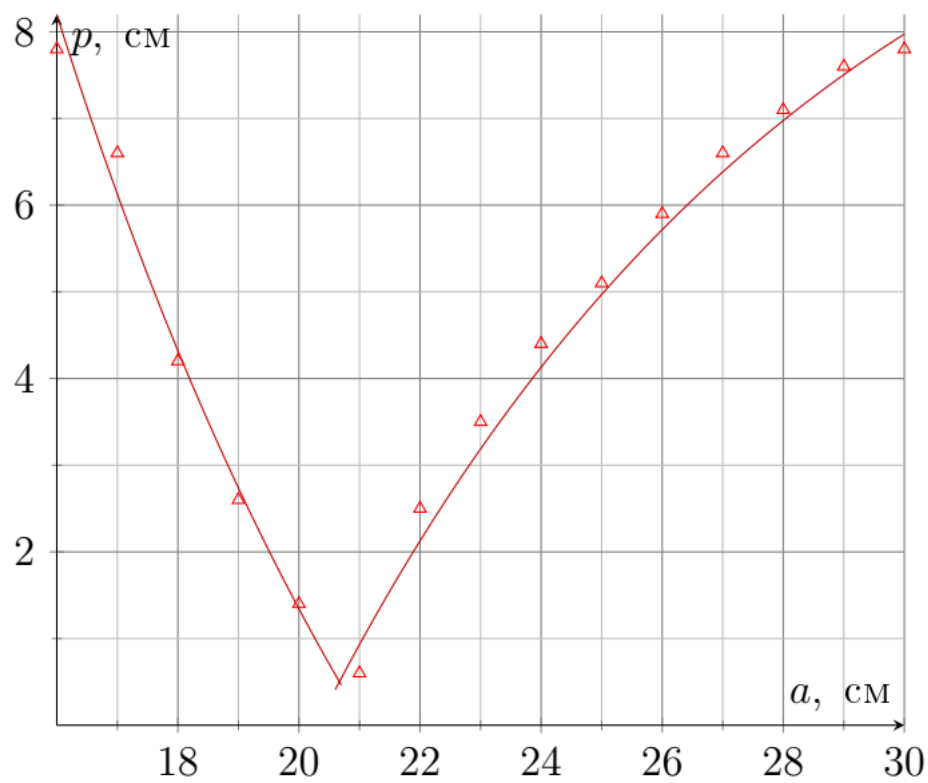
B4^{0.10} При том же расположении объектов снимите диафрагму с линзы и измерьте размер p_0 изображения на экране. Определите диаметр D_0 открытой части линзы на основе p_0 , сравните результат с непосредственными измерениям.

Коэффициенты линейной зависимости: $p = -0.17 \text{ см} + 1.3 \cdot D$. При этом $p_0 = 7.0 \text{ см}$.

Из этой зависимости $D_0 = 5.5 \text{ см}$. Из непосредственных измерений $D_0 = 5.2 \text{ см}$

B5^{0.55} При 11 различных a в диапазоне $[a_0 - F/3, a_0 + F/2]$ измерьте размер p изображения на экране.

Ответ:



В6 1.30

Постройте линеаризованный график зависимости p от a . Из графика найдите фокусное расстояние F и сравните его с полученным ранее. Считайте, что спираль накаливания имеет размеры $0.10 \text{ см} \times 0.30 \text{ см}$.

Из формулы тонкой линзы

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{a} = \frac{1}{F} \Rightarrow b = \frac{Fa}{a - F},$$

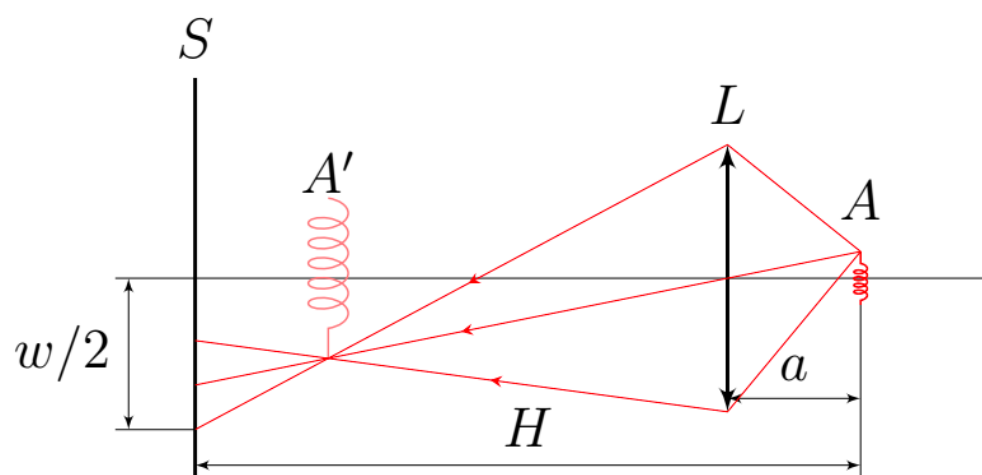
а размер w' изображения A' равен $W_A \frac{b}{a}$ и не зависит от сфокусированности на экране.

При $a > a_0$ граница изображения на экране определяется лучем, проходящим через противоположный край линзы. Из геометрии:

$$\frac{w - w'}{H - a - b} = \frac{D + w'}{b}$$

Путем преобразований получим:

$$w = W_A \frac{H - a}{a} + D \frac{a^2 - aH + FH}{aF}$$



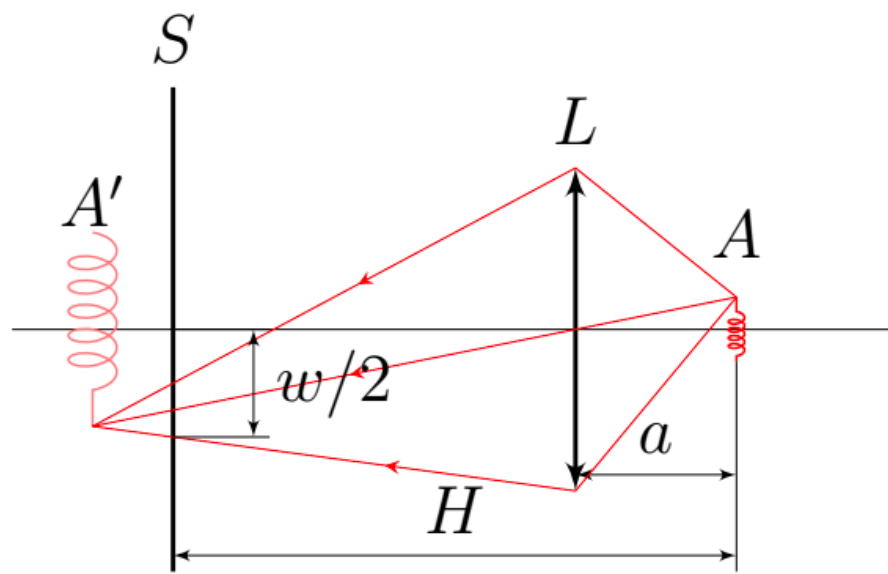
Случай $a > a_0$

При $a > a_0$ граница изображения на экране определяется лучем, проходящим через ближний край линзы. Из геометрии:

$$\frac{w - w'}{a + b - H} = \frac{D - w'}{b}$$

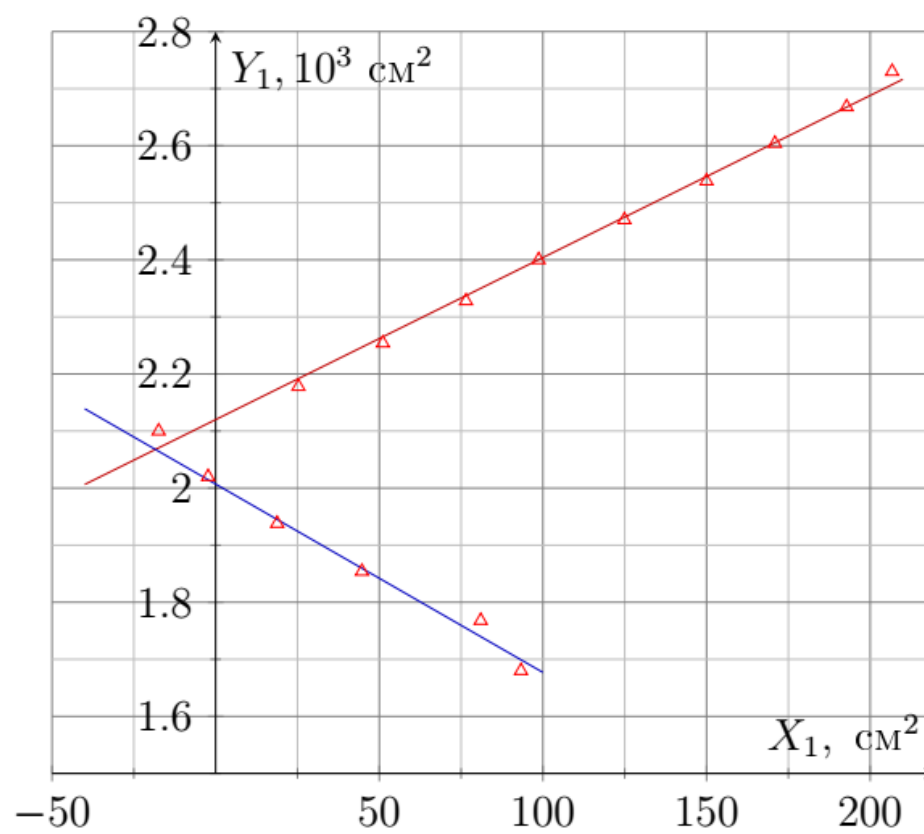
Путем преобразований получим:

$$w = W_A \frac{H - a}{a} - D \frac{a^2 - aH + FH}{aF}$$



Линеаризация:

$$(aH - a^2) = \pm \frac{F}{D}(wa - W_A(H - a)) + FH$$



Координаты $X_1 = wa - W_A(H - a)$, $Y_1 = aH - a^2$,

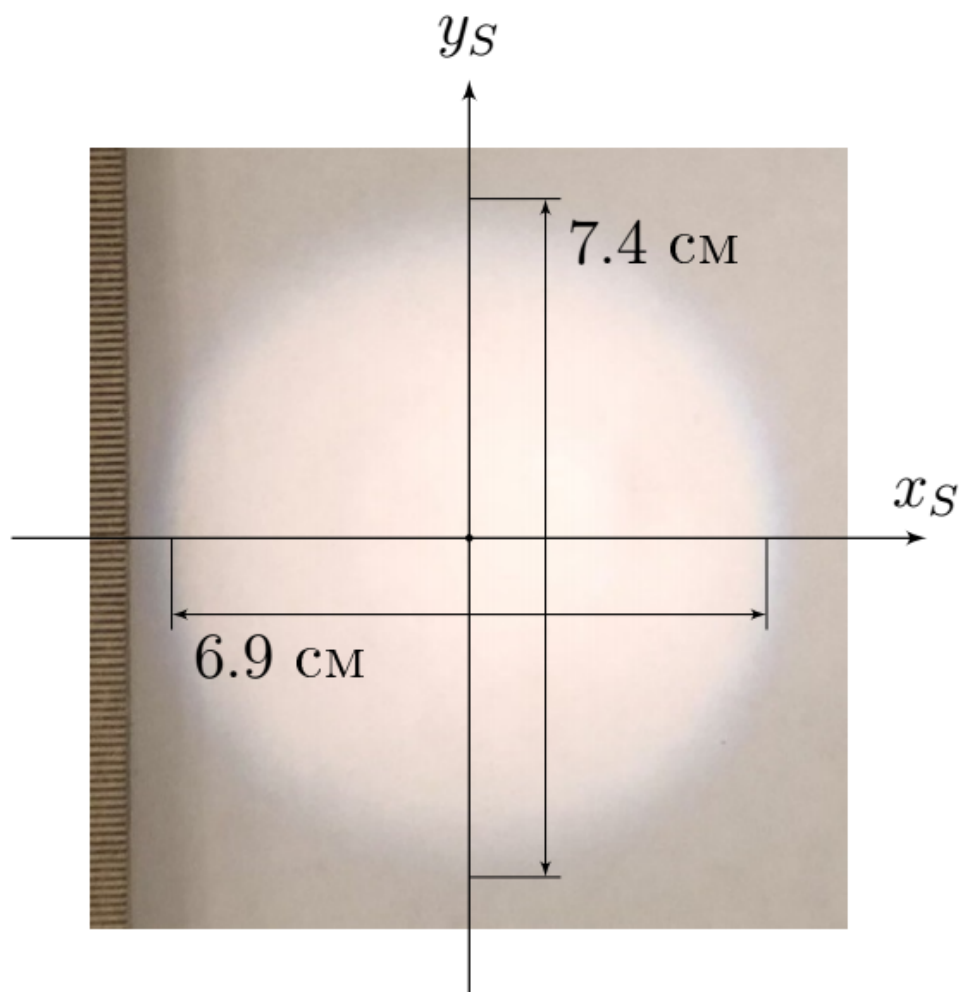
Ответ: Из графика можно получить F четырьмя способами.

Для красной линии из свободного члена равного FH следует, что $F = 17.0$ см, из коэффициента наклона равного F/D следует, что $F = 15.7$ см.

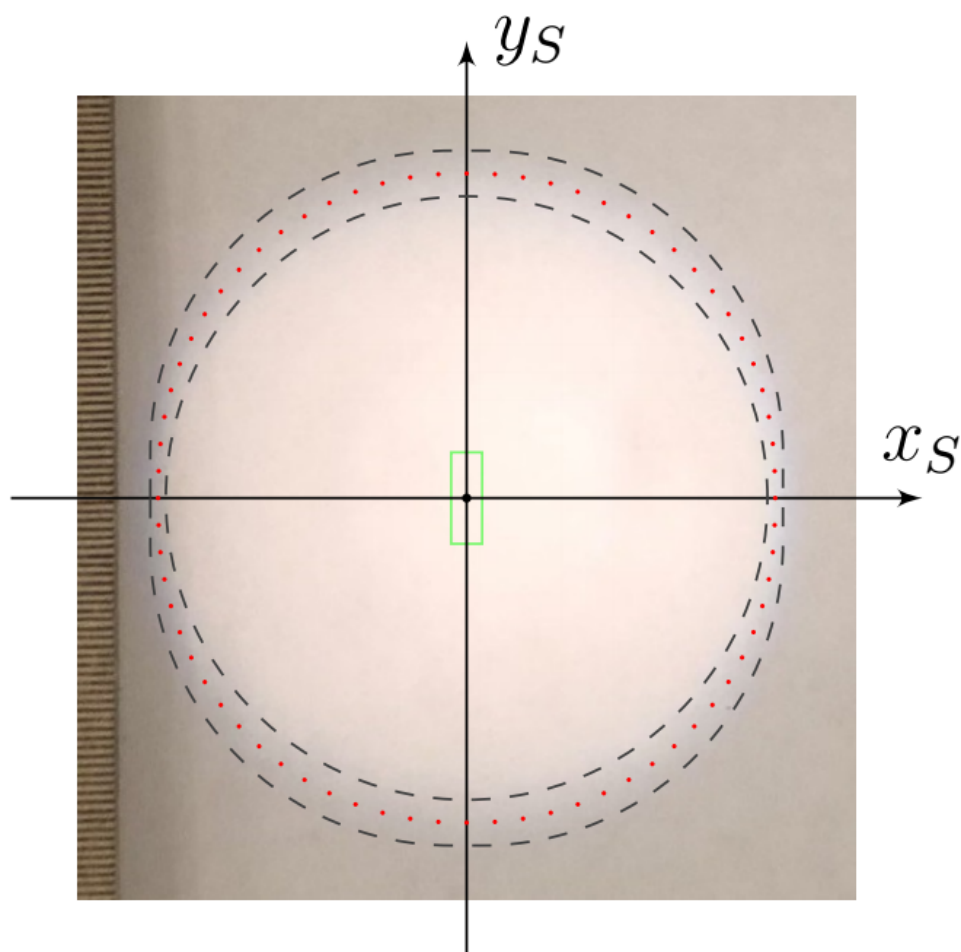
Для синей линии из свободного члена равного FH следует, что $F = 17.3$ см, из коэффициента наклона равного $-F/D$ следует, что $F = 17.2$ см.

В7^{0.30}

Расположите линзу так, чтобы $a = a_0 + 2F/5$. Зарисуйте границу изображения на миллиметровой бумаге. Обозначьте центр изображения, горизонтальную ось x_S и вертикальную ось y_S .



B8 ^{0.80} Рассчитайте положение границы Γ изображения относительно его центра в 11 точках, лежащих в области $x_S > 0, y_S > 0$. Нанесите эти точки на тот же лист миллиметровой бумаги, где зарисовано изображение.



Зеленый прямоугольник -- контуры спирали, которые могли бы наблюдаться при очень маленькой диафрагме. Серыми контурами обозначены контур пятна от точечного источника (оценка снизу) и контур от прямоугольного источника. Красным обозначены точки лежащие посередине между этими кривыми -- эти точки и являются теоретической границей.

C1 ^{0.06} В листах ответов поставьте крестик напротив истинных утверждений.

Ответ:

L_F	Граница синяя при $a < a_0$, красная при $a > a_0$	
L_F	Граница красная при $a < a_0$, синяя при $a > a_0$	☒
L_f	Граница синяя при $a < a_0$, красная при $a > a_0$	

L_f

Граница красная при $a < a_0$, синяя при $a > a_0$

×

C2^{0.50}

В листах ответов поставьте крестик напротив истинных утверждений о n_b и n_r . Обоснуйте свой выбор.

Как видно из эксперимента при $a > a_0$ границы изображения синие, из этого следует, что синие лучи фокусируются ближе ($b_b < b_r$), из чего следует

$$\frac{1}{b_b} > \frac{1}{b_r} \Rightarrow \frac{1}{F_b} > \frac{1}{F_r},$$

откуда следует ответ из формулы шлифовщика:

$$\frac{1}{F} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

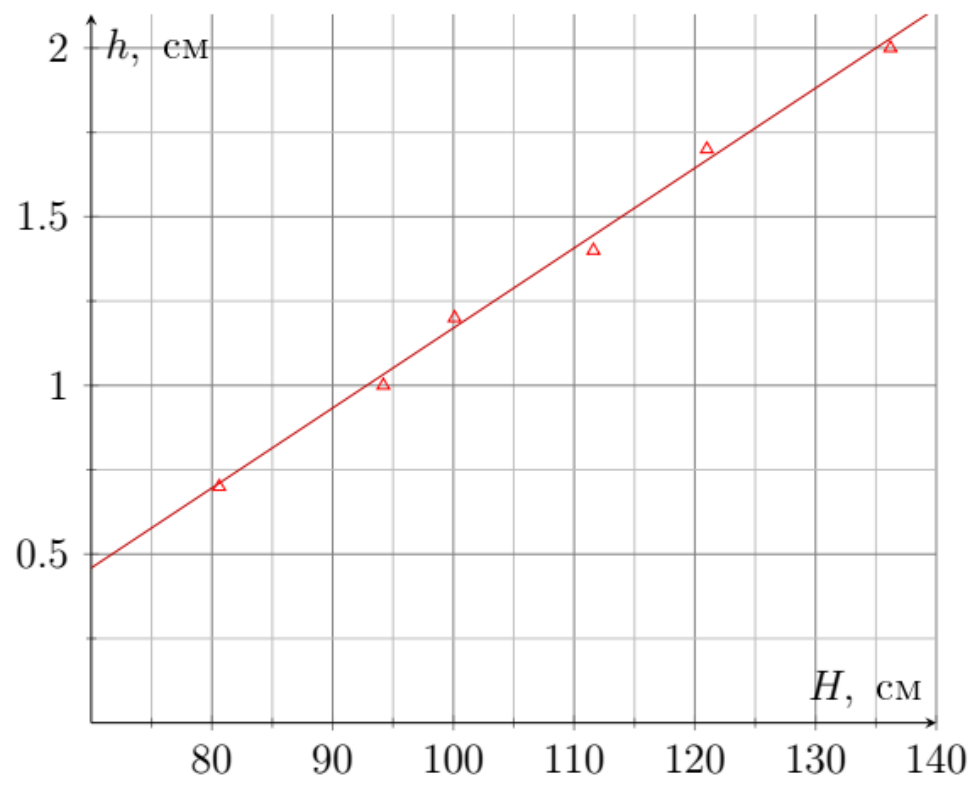
Ответ:

L_F	$n_b > n_r$	×
L_F	$n_r > n_b$	
L_f	$n_b > n_r$	×
L_f	$n_r > n_b$	

D1^{0.70}

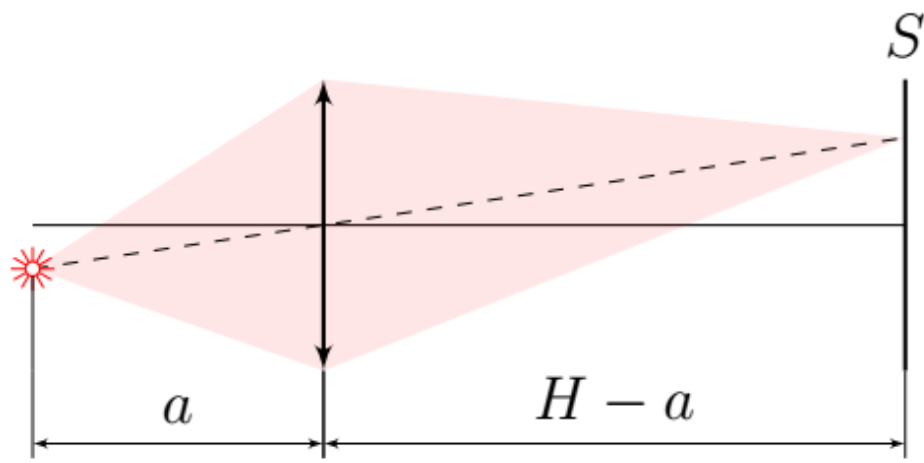
При 7-ми различных H измерьте размер изображения p в условиях ближней фокусировки.

Ответ:



D2^{0.55}

Линеаризуйте зависимость p от H , постройте ее график. Рассчитайте параметры источника W_A и H_A , сделав дополнительные измерения при необходимости.



Высота сфокусированного изображения h выражается через высоту спирали H_A :

$$\frac{H_A}{a} = \frac{w}{H - a}.$$

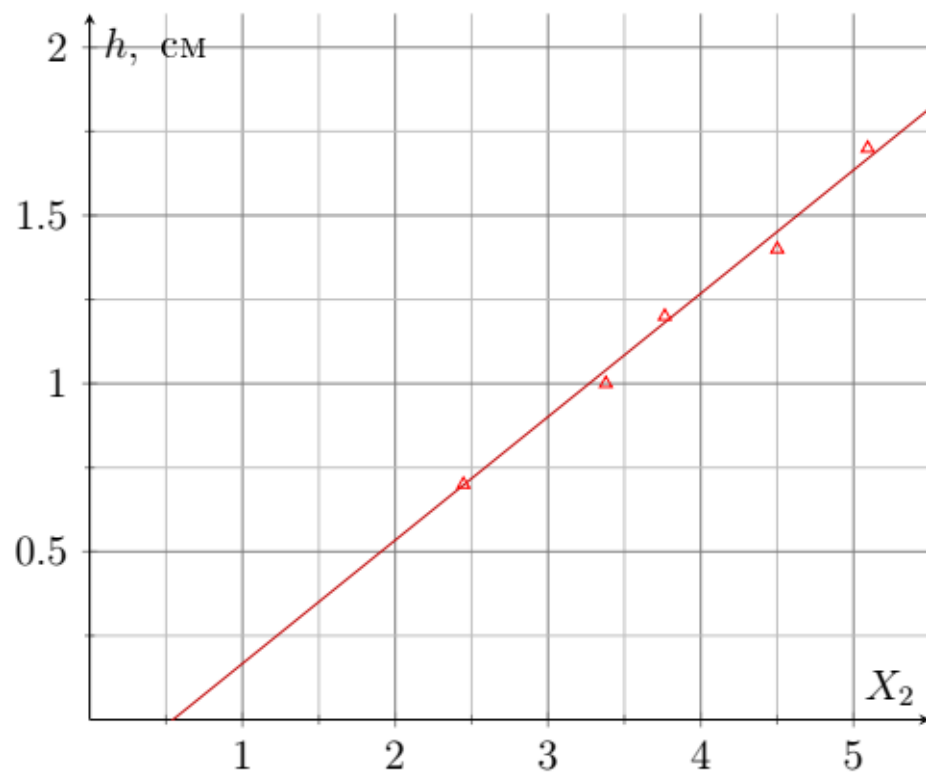
Найдем a из формулы тонкой линзы:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{H - a} = \frac{1}{F} \Rightarrow a^2 - aH + FH = 0$$

Из двух корней нас интересует меньший $a = \frac{1}{2}(H - \sqrt{H^2 - 4FH})$.

В таком случае линейной с коэффициентом наклона H_A оказывается зависимость h от X_2 , где

$$X_2 = \frac{H + \sqrt{H^2 - 4FH}}{H - \sqrt{H^2 - 4FH}}$$



$$\text{Координата } X_2 = \frac{H + \sqrt{H^2 - 4FH}}{H - \sqrt{H^2 - 4FH}}.$$

Ответ: Из коэффициент наклона графика $H_A = 0.37$ см.

Измерим отношение $\frac{H_A}{W_A}$ по увеличенному изображению: $\frac{H_A}{W_A} = \frac{3.1 \text{ см}}{1.0 \text{ см}}$, значит $W_A = 0.12$ см.

D3^{0.10}

Посчитайте количество спиралей N_A в спирали источника.

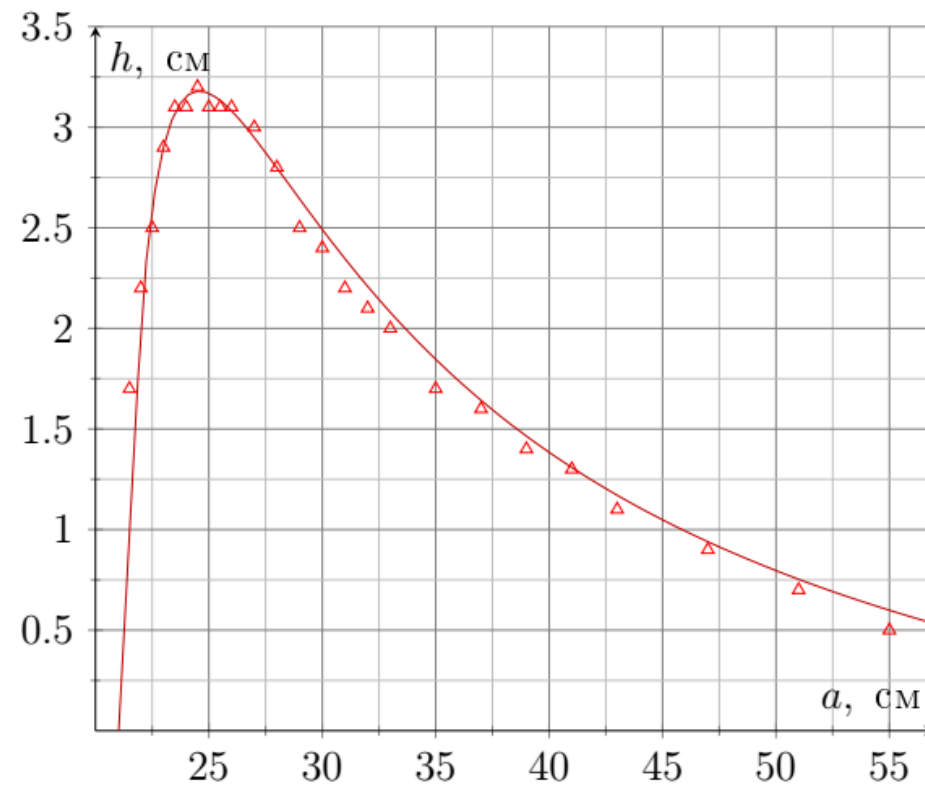
Ответ: Посмотрим на увеличенное с помощью линзы изображение на экране, также будем использовать диафрагму, чтобы уменьшить размытие из-за aberrаций.

$$N_A = 18$$

Е1 0.85

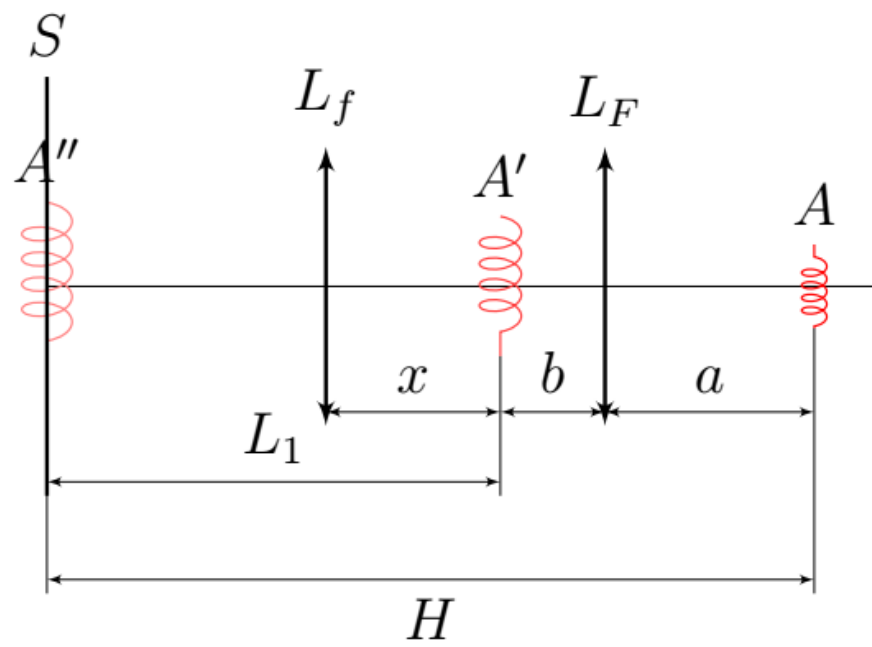
При различных фиксированных значениях a подберите расстояния l , соответствующие четкому изображению. Измерьте высоту четкого изображения h . Если при нескольких разных значениях l получается несколько четких изображений, то выбирайте изображение, имеющее большее h . У зависимости h от a есть характерная точка, опишите ее и промерьте ее окрестность особенно тщательно. Всего сделайте не менее 15-ти измерений.

Ответ:



Е2 1.74

Получите теоретическую формулу для зависимости h от a . Постройте линеаризованный график и покажите, что теоретическая формула справедлива.



Формулы тонкой линзы:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{F} \Rightarrow b = \frac{aF}{a - F},$$

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{L_1 - x} = \frac{1}{f}, \quad L_1 = H - a - b$$

Получим уравнение на x из второй формулы тонкой линзы:

$$x^2 - xL_1 - fL_1 = 0, \quad \mathcal{D} = L_1^2 - 4fL_1, \quad x_{1,2} = L_1 \frac{1 \pm \sqrt{1 - \frac{4f}{L_1}}}{2}.$$

При меньшем x изображение больше, поэтому выбираем корень с минусом.

Теперь выразим высоту h изображения A'' , пусть высота A' – h' . Из подобных треугольников:

$$\frac{H_A}{a} = \frac{h'}{b}, \quad \frac{h'}{x} = \frac{h}{L_1 - x}.$$

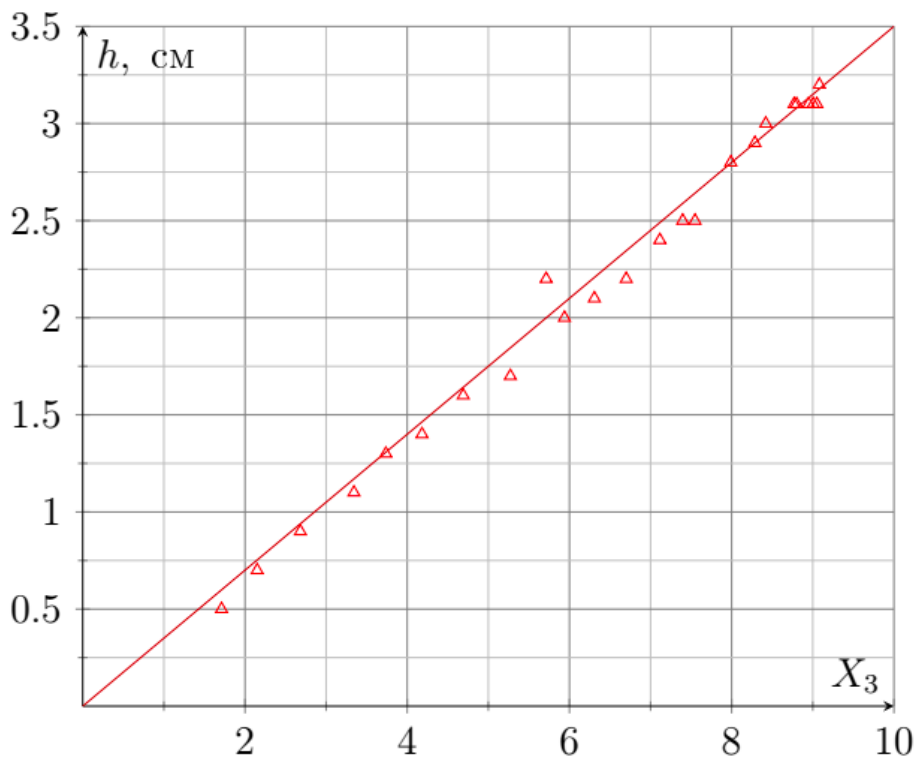
В итоге

$$h = \frac{L_1 - x}{x} \frac{b}{a} H_A = \frac{1 + \sqrt{1 - \frac{4f}{L_1}}}{1 - \sqrt{1 - \frac{4f}{L_1}}} \frac{F}{a - F} H_A,$$

где $L_1 = H - a - \frac{aF}{a-F}$.

Таким образом линейаризация h от X_3 , где

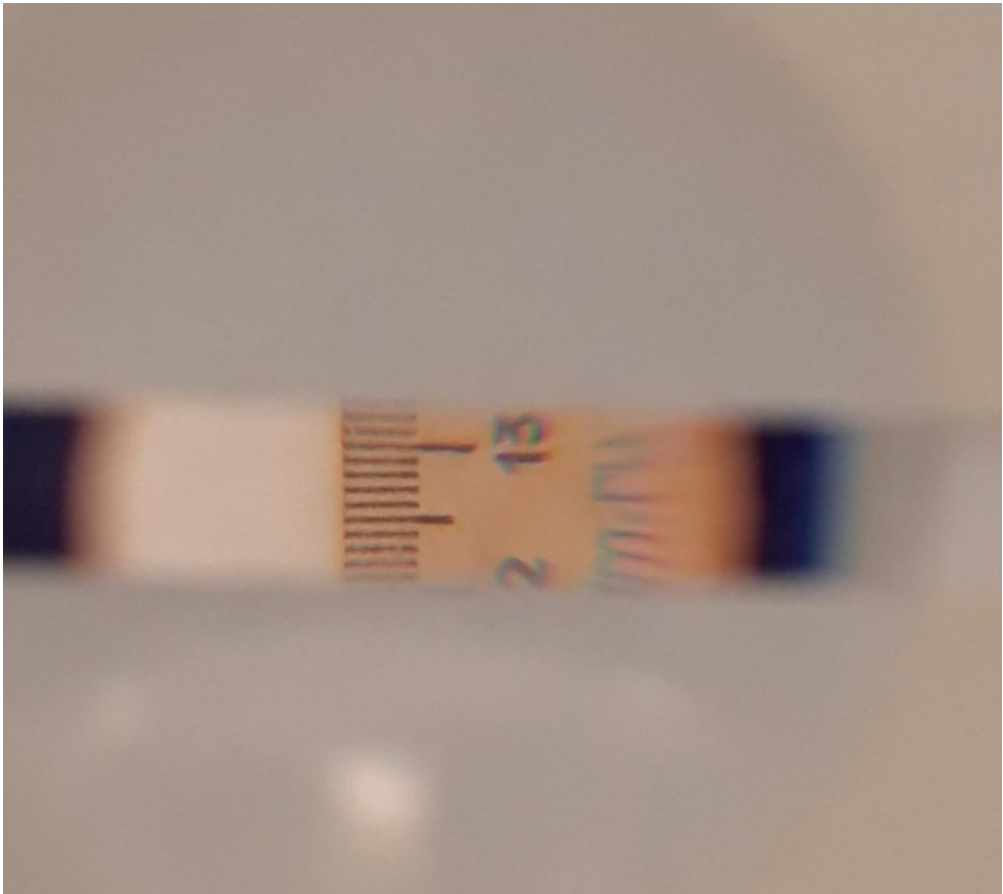
$$X_3 = \frac{1 + \sqrt{1 - \frac{4f}{H - a - \frac{aF}{a-F}}}}{1 - \sqrt{1 - \frac{4f}{H - a - \frac{aF}{a-F}}}} \frac{F}{a - F}.$$



Ответ: Коэффициент наклона графика $k = 0.35$ см, что полностью соответствует H_A полученному в других пунктах.

ЕЗ^{0.80} Настройте телескоп Кеплера так, чтобы расстояние между линзой L_f и линейкой было $H \approx 1.20$ м, и через телескоп Вам было четко видно увеличенное изображение линейки. Сделайте необходимые измерения и рассчитайте экспериментальное значение увеличения Γ_K телескопа Кеплера в такой системе.

Увеличение телескопа Кеплера можно оценить, если сравнить видимое изображение линейки с другим известным размером. Например, на пластиковое обрамление линзы наклеить две полоски малярного скотча. На фотографии показан процесс таких измерений.



Ответ: С расстояния $L_{\Gamma} = 33$ см мы видим, что щели толщиной $h_{\Gamma} = 21$ мм соответствует $H_{\Gamma} = 23$ мм на линейке. Расстояние между линейкой и линзой $H = 118$ см. Значит увеличение Γ можно найти так:

$$\Gamma = \frac{h_{\Gamma}}{L_{\Gamma}} \cdot \frac{H + L_{\Gamma}}{H_{\Gamma}} = 4.2$$

E4^{0.40} Пронаблюдайте искажение изображения линейки у краев области видимости телескопа. Зарисуйте видимое через телескоп Кеплера изображение линейки. На рисунке отобразите и хроматические, и сферические aberrации.

Ответ:

