

Лабораторная работа 6.1  
Исследование резонансного поглощения  $\gamma$ -квантов  
(эффект Мессбауэра)

Нехаев Александр, гр. 654

27 сентября 2018 г.

# Содержание

<b>1. Введение</b>	<b>2</b>
<b>2. Ход работы</b>	<b>4</b>
2.1. Измерение спектра источника . . . . .	4
2.2. Измерение резонансного поглощения . . . . .	6

# 1. Введение

**Цель работы:** С помощью метода доплеровского сдвига мессбауэровской линии поглощения исследуется резонансное поглощение  $\gamma$ -лучей, испускаемых ядрами олова  $^{119}\text{Sn}$  в соединении  $\text{BaSnO}_3$  при комнатной температуре. Определяется положение максимума резонансного поглощения, его величина, а также экспериментальная ширина линии  $\Gamma_{\text{экс}}$ . Оценивается время жизни возбужденного состояния ядра  $^{119}\text{Sn}$ .

**В работе используются:** (См рис. 1) Э – эксцентрик, С – сцинтилляционный кристалл  $\text{NaI}(\text{Tl})$ , У – усилитель, АА – одноканальный амплитудный анализатор, ЭВМ – ПК, Г – генератор питания двигателя, РД-09 – двигатель с редуктором, ВСВ – высоковольтный стабилизированный выпрямитель.

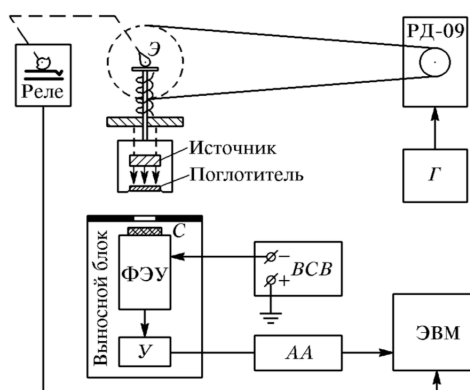


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

**Теоретические основы** Нуклоны в атомном ядре, как и электроны в атоме, могут находиться в различных дискретных энергетических состояниях, или, как говорят, на различных энергетических уровнях. Самый низкий из уровней называется основным, остальные носят название возбужденных. Ядра, находящиеся в возбужденных состояниях, могут переходить на более низкие энергетические уровни, в том числе и на основной уровень. Такие переходы происходят самопроизвольно. Освобождающаяся энергия уносится фотоном. Так возникает  $\gamma$ -излучение.

В отличие от основного уровня, все возбужденные уровни ядра имеют конечную ширину. Отложим по оси абсцисс энергию ядра, а по оси ординат – вероятность найти ядро в состоянии с данной энергией (рис. 2а). Ширина кривой, измеренная на половине высоты, называется естественной шириной линии  $\Gamma$ . Она связана со средним временем жизни  $\tau$  возбужденного состояния ядра соотношением неопределенностей

$$\Gamma\tau \simeq \hbar \quad (1)$$

где  $\hbar$  – постоянное Планка. Неопределенность в энергии возбужденных уровней приводит к появлению ширины у линий  $\gamma$ -излучения.

Ядра атомов могут не только испускать, но и поглощать фотоны. Если попадающий в атомное ядро фотон имеет энергию, равную разности энергий между основным и каким-либо возбужденным состояниями, то ядро может поглотить фотон и перейти в соответствующее возбужденное состояние. Этот процесс возможен лишь для  $\gamma$ -лучей определенных энергий и носит, таким образом, резонансный характер.

Энергия  $E_\gamma$ , уносимая  $\gamma$ -квантом, оказывается меньше энергии  $E_0$  перехода между уровнями. Небольшая, но вполне заметная доля энергии уносится ядром, которое вследствие отдачи начинает двигаться в сторону, противоположную направлению вылета  $\gamma$ -кванта.

Ядро, которое испускает  $\gamma$ -квант, приобретает импульс отдачи, равный по абсолютной величине импульсу  $\gamma$ -кванта. Если ядро свободно и первоначально покоится, то энергия отдачи  $R$  равна

$$R = \frac{p^2}{M_{\text{я}}} = \frac{E_\gamma^2}{2M_{\text{я}}c^2}. \quad (2)$$

Рассмотрим в качестве примера ядро олова  $^{119}\text{Sn}$ , у которого расстояние между основным и первым возбужденным уровням равно  $E_0 = 23.8$  кэВ. Энергия отдачи в этом случае составляет<sup>1</sup>

$$R = \frac{E_\gamma^2}{2M_{\text{я}}c^2} \simeq \frac{E_0^2}{2M_{\text{я}}c^2} = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}.$$

Энергия, которая расходуется на отдачу ядра, поглощающего  $\gamma$ -квант, оказывается точно такой же. Эта картина иллюстрирует рис.2б: линия испускания смещена на величину  $R$  влево, а линия поглощения – на столько же вправо от  $E_0$ .

Обсуждая влияние, которое оказывает сдвиг  $R$  на резонансное поглощение  $\gamma$ -лучей, следует иметь в виду, что величина  $R$  сама по себе не представляет существенного интереса. Важно соотношение между  $R$  и шириной  $\Gamma$  соответствующей резонансной линии. Резонансное поглощение возможно только в том случае, если спектры испускания и поглощения перекрываются, т.е. при условии

$$2R \leq \Gamma. \quad (3)$$

Это условие почти никогда не выполняется для  $\gamma$ -переходов в свободных ядрах. Так, для рассмотренного ядра  $^{119}\text{Sn}$  естественная ширина линии  $\Gamma \simeq 3 \cdot 10^{-8}$  эВ, т.е. на много порядков величины меньше  $R^2$ . В принципе, можно компенсировать энергетический сдвиг  $2R$  с помощью эффекта Доплера. Для этого изучающие и поглощающие ядра должны двигаться друг относительно друга со скоростью  $V$ , равной

$$V = c \cdot 2R/E_\gamma. \quad (4)$$

Для ядер  $^{119}\text{Sn}$  нужна скорость  $V \simeq 60$  м/с.

В реальных условиях ширина линии испускания (и поглощения) складывается из собственной ширины линии и её доплеровской ширины. Из этих двух ширин основную роль играет именно доплеровская ширина уровней, связанная с тепловым движением атомов. Произведем соответствующие оценки. Доплеровский сдвиг уровней  $D$  можно рассчитывать по нерелятивистским формулам, поскольку  $v$  - тепловая скорость атомов – много меньше скорости света:

$$D = \frac{v}{c} E_\gamma \simeq \frac{v}{c} E_0. \quad (5)$$

<sup>1</sup>Величины  $E_0$ ,  $E_\gamma$  и  $R$  связаны законом сохранения энергии:  $E_0 = E_\gamma + R$ . Поскольку  $R \ll E_\gamma$ , в формуле (2)  $E_\gamma$  можно заменить на энергию возбужденного состояния  $E_0$ .

<sup>2</sup>Заметим, что при оптических переходах в атомах соотношение между  $R$  и  $\Gamma$  существенно меняется. В этом случае энергии переходов оказываются на 4 порядка и, следовательно,  $R$  на 8 порядков величины меньше, чем при  $\gamma$ -излучении, а ширины уровней оказываются, грубо говоря, того же порядка. В этом случае поглощение легко наблюдается.

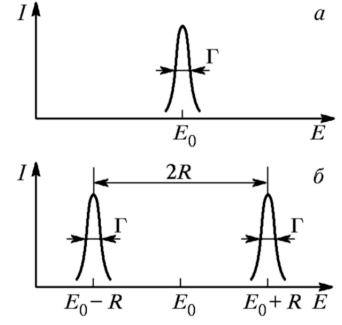


Рис. 2: Энергетическое распределение, характеризующее возбужденное состояние ядра (а), и сдвиг линий испускания и поглощения из-за отдачи при свободных ядрах(б).

Оценим величину  $v$ . Средняя кинетическая энергия, приходящаяся на одну степень свободы (движение по направлению к поглотителю или от него), равна  $k_B T/2$ . Имеем поэтому:

$$\frac{M_{\text{я}} v^2}{2} = \frac{k_B T}{2},$$

или

$$v = \sqrt{k_B T / M_{\text{я}}}. \quad (6)$$

Подставляя это значение в формулу (5) и принимая во внимание (2), найдем

$$D = \sqrt{2 R k_B T}$$

Более аккуратный расчет дает

$$D = 2 \sqrt{R k_B T} \quad (7)$$

При комнатных температурах  $k_B T \simeq 1/40$  эВ. Для  $^{119}\text{Sn}$  имеем:

$$D = 1.5 \cdot 10^{-2} \text{ эВ}.$$

## 2. Ход работы

### 2.1. Измерение спектра источника

- 1) Включим приборы и после прогрева установим напряжение на ФЭУ. Включим компьютер.
- 2) Изменяя нижний порог окна сцинтилляционного спектрометра шириной 0.5 В, измерим спектр источника:

Таблица 1: Значения спектра источника

Номер	Нижний порог	Интенсивность
1	0.0	145862.6
2	0.5	350.0
3	1.0	771.2
4	1.5	179.6
5	2.0	26.2
6	2.5	33.0
7	3.0	70.8
8	3.5	109.8
9	4.0	151.0
10	4.5	178.6
11	5.0	196.8
12	5.5	183.8
13	6.0	143.0
14	6.5	83.6
15	7.0	47.8
16	7.5	23.2
17	8.0	10.8
18	8.5	5.8
19	9.0	6.0
20	9.5	4.6

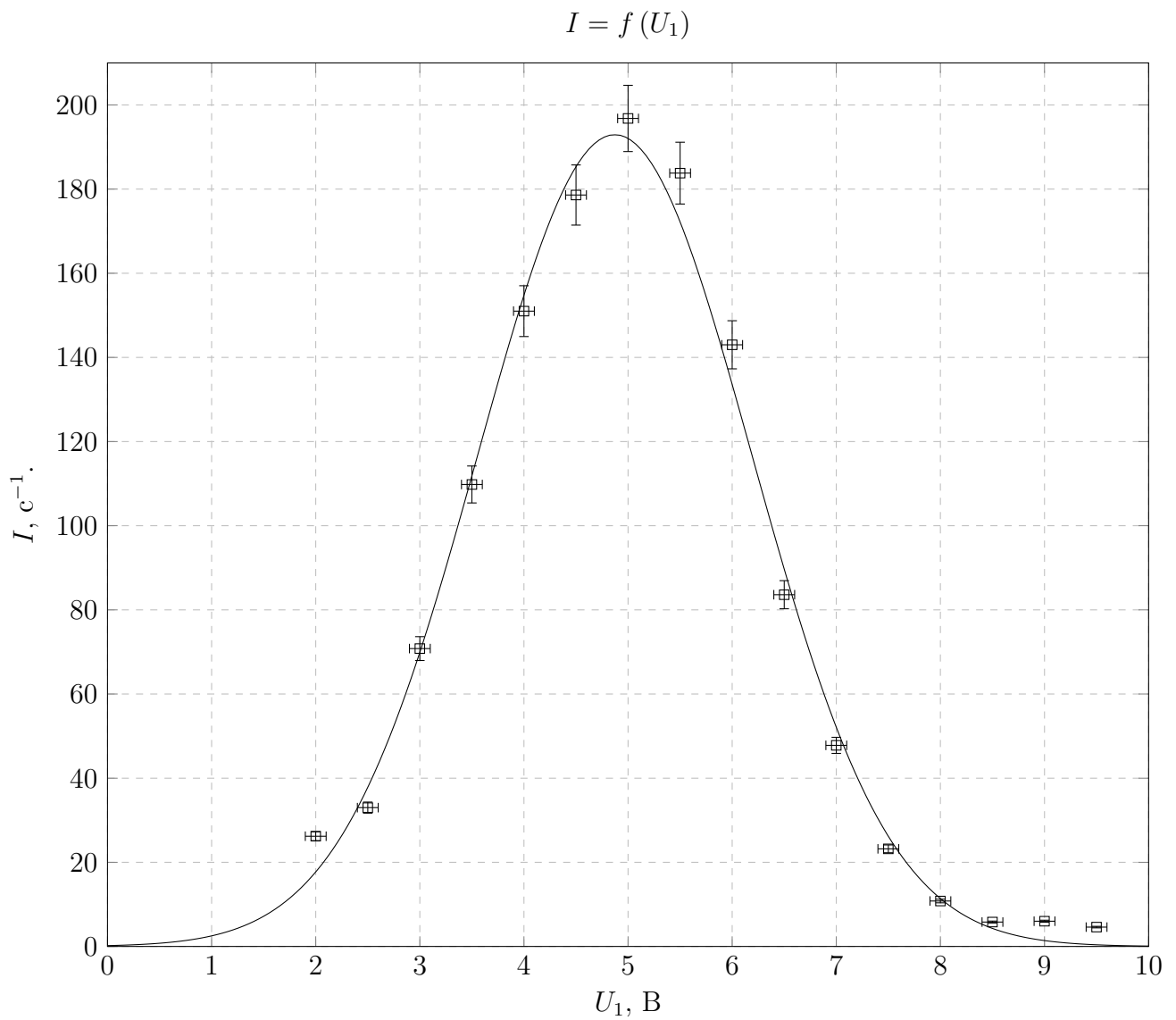


Рис. 3: Спектр источника

3) Построим график  $I = f(U_1)$  (рис. 3).

Аппроксимируем график по Гауссовскому распределению вида

$$y = \frac{A \cdot e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi}\sigma}$$

и получаем коэффициенты

$$A = (635.64 \pm 18.84), x_0 = (4.87 \pm 0.04), \sigma = (1.314 \pm 0.033)$$

упрощая, получаем уравнение

$$y = (192.9 \pm 7.5)e^{-(0.29 \pm 0.03)(x - (4.87 \pm 0.04))^2}$$

Из графика, с учетом аппроксимации находим, что энергия 23.8 эВ соответствует значению  $U_1 = 4.87$  В.

## 2.2. Измерение резонансного поглощения

- 4) Установим окно сцинтилляционного спектрометра, соответствующее ширине линии спектра излучения 3.5 – 7 В, и проведем измерения резонансного поглощения:

а) Поглощение на Sn(100)

Используя Лоренцовское распределение, получили кривую, изображенную на рис. ???. Полученное значение  $\Gamma/2 = (0.843 \pm 0.069)$  мм/с. Химический сдвиг  $E_0 = 0.843 \pm 0.069$  мм/с.

б) Поглощение на Sn(200)

Используя Лоренцовское распределение, получили кривую, изображенную на рис. ???. Полученное значение  $\Gamma/2 = (1.178 \pm 0.111)$  мм/с. Химический сдвиг  $E_0 = 2.526 \pm 0.027$  мм/с

в) Поглощение на SnO<sub>2</sub>

Используя Лоренцовское распределение, получили кривую, изображенную на рис. ???. Полученное значение  $\Gamma/2 = (2.142 \pm 0.116)$  мм/с. Химический сдвиг  $E_0 = 0.006 \pm 0.022$  мм/с

№	$v_-$	$I_-$	$v_+$	$I_+$
1	1.44	871.7	1.52	853.3
2	1.52	852.1	1.61	850.1
3	1.48	858.4	1.59	843.1
4	1.37	852.4	1.51	853.6
5	1.21	834.4	1.35	842.6
6	4.44	856.6	4.71	848.4
7	3.71	845.9	3.92	846.7
8	3.08	857.9	3.27	840.0
9	2.48	847.0	2.64	750.8
10	2.12	841.9	1.67	838.1
11	1.57	858.0	1.64	837.1
12	1.55	841.3	1.16	841.4
13	1.06	857.6	2.79	764.0
14	2.62	869.2	3.0	793.3
15	2.83	869.1	3.16	812.6
16	2.99	852.9	3.49	828.7
17	2.16	850.5	3.12	815.8
18	1.85	856.1	2.82	778.5
19	2.34	854.7	2.32	762.0
20	2.11	858.0	1.99	812.8
21	1.93	838.0	2.48	755.3
22	2.25	845.6	2.22	792.8
23	3.28	849.8	2.04	799.9
24	2.94	847.7	2.41	764.4
25	2.66	855.3	2.24	791.3

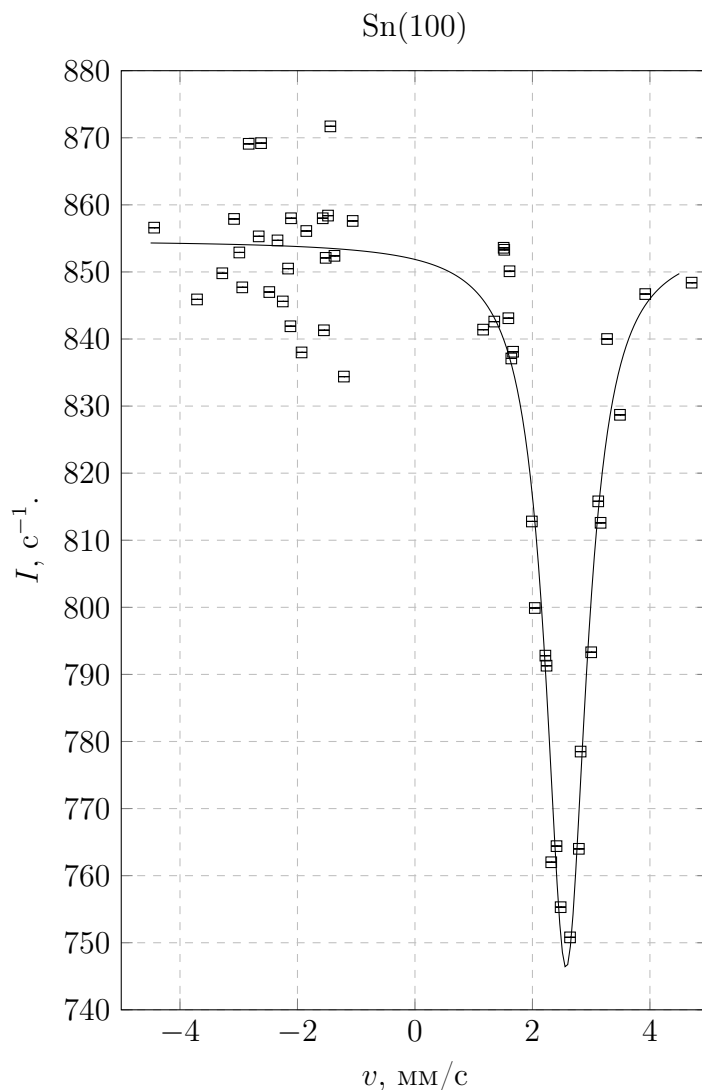


Рис. 4: График для Sn(100)

№	$v_-$	$I_-$	$v_+$	$I_+$
1	2.67	384.7	2.83	314.1
2	3.09	382.7	3.26	347.2
3	3.5	385.8	3.73	372.8
4	3.9	380.3	4.14	372.4
5	4.32	384.4	4.55	374.1
6	2.44	379.3	2.61	311.5
7	1.65	381.8	1.7	366.7
8	1.99	385.8	2.12	329.
9	2.7	382.2	2.84	324.7
10	2.93	368.9	3.12	342.6
11	3.04	371.2	3.24	365.9
12	2.67	379.3	2.82	327.2
13	2.43	379.6	2.56	317.5
14	2.17	380.6	2.31	313.9
15	1.94	372.2	2.07	338.1
16	1.72	373.9	1.85	346.9
17	1.45	390.	1.54	360.9
18	1.14	384.6	1.2	379.5
19	0.7	375.7	0.77	371.8
20	1.65	396.	1.77	358.3
21	1.9	374.7	2.04	337.1

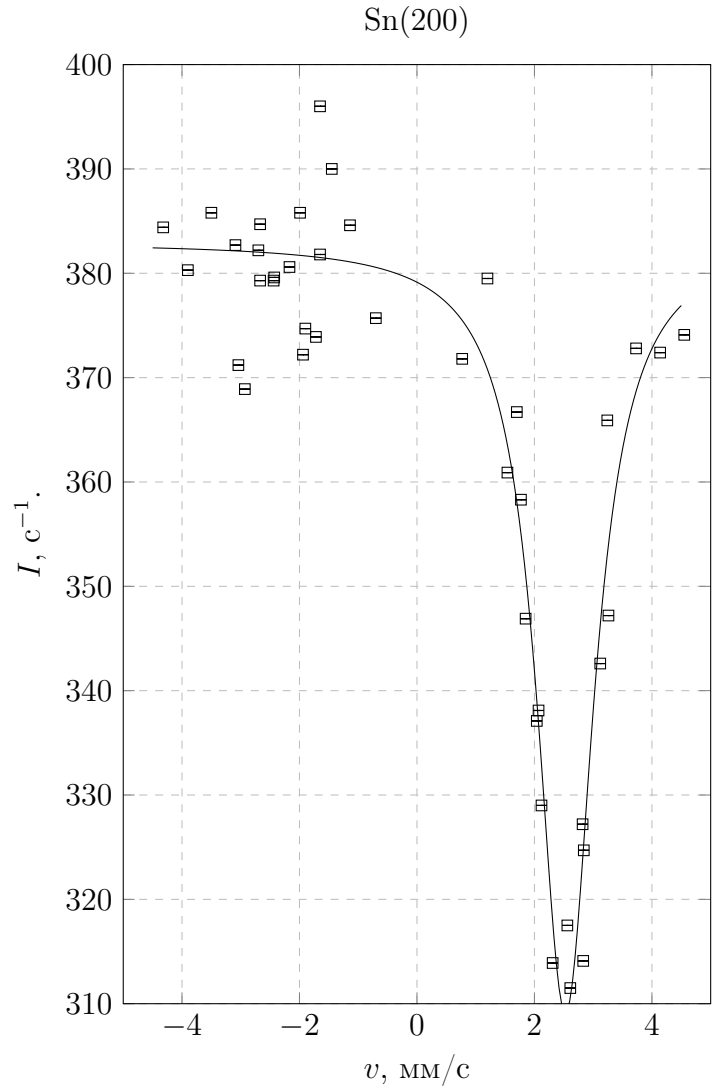


Рис. 5: График для Sn(200)



№	$v_-$	$I_-$	$v_+$	$I_+$
1	0.72	610.6	0.76	619.4
2	0.87	606.	0.93	628.5
3	1.14	654.2	1.21	667.1
4	1.43	686.3	1.53	692.2
5	1.29	673.3	1.38	682.8
6	1.06	652.9	1.23	669.3
7	2.8	743.4	2.98	758.8
8	3.42	757.9	3.59	758.1
9	4.12	750.2	4.37	769.7
10	4.5	751.7	4.77	772.
11	2.51	739.3	2.64	744.
12	2.24	745.6	2.39	750.5
13	1.65	704.4	1.76	728.2
14	1.08	661.9	1.16	649.2
15	0.33	550.3	0.39	556.9
16	0.21	544.	0.25	546.3
17	0.48	565.8	0.53	591.6
18	0.73	603.3	0.75	611.1

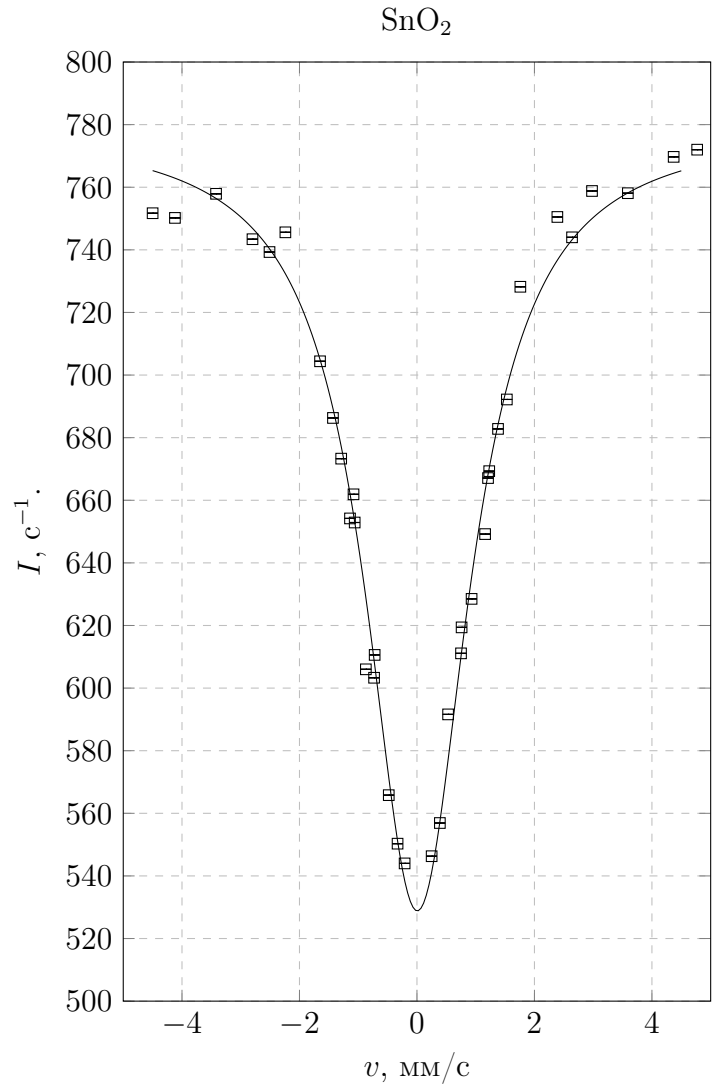


Рис. 6: График для SnO<sub>2</sub>