

Работа 5.1

Исследования резонансного поглощения γ -квантов

Описание работы: С помощью метода доплеровского сдвига мессбауэровских линий испускания и поглощения исследуется резонансное поглощение квантов, испускаемых ядрами олова ^{199}Sn при комнатной температуре. Определяется положение максимума резонансного поглощения, его величина, а так же экспериментальная ширина линии $\Gamma_{\text{экс}}$.

Теоретическое введение

Испускание и поглощение в свободных атомах

Нуклоны (нейтроны и протоны) 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 (спонтанно). Освобождающаяся энергия уносится фотоном. Так возникает γ -излучение.

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 γ -лучей определенных энергий и носит, таким образом, резонансный характер.

На первый взгляд резонансное поглощение γ -лучей должно представлять собой распространенное и легко наблюдаемое явление. Казалось бы, для его обнаружения достаточно пропустить поток γ -лучей, испущенных радиоактивным источником, через поглотитель, содержащий те же ядра в невозбужденном состоянии. На самом деле это не так. Дело в том, что энергия E_γ , уносимая γ -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 γ -кванта.

При испускании фотона ядро приобретает энергию отдачи

$$R = \frac{p^2}{2M} = \frac{E_\gamma^2}{2Mc^2}$$

Для ядра ^{119}Sn , который используется в работе, $E_0 \simeq E_\gamma = 23,8 \text{ кэВ}$, $R \simeq 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ эВ} \gg \Gamma/2 \simeq 3 \cdot 10^{-8} \text{ эВ}$, где Γ --- естественная ширина линии. Из-за такой разницы в порядках величин получается, что при смещении на величину $\pm R$ не перекрываются. Однако, это можно компенсировать эффектом Доплера, который возникает из-за теплового движения ядер. Для этого ядра должны двигаться относительно друг друга со скоростью

$$V = c \frac{2R}{E_\gamma}$$

Это примерно 60 м/с для ^{119}Sn . Из термодинамических соображений оценим скорость движения ядра v :

$$\frac{Mv^2}{2} = \frac{kT}{2} \quad v = \sqrt{\frac{kT}{M}}$$

Тогда величину D доплеровского "уширения" линии можно оценить как

$$D = \frac{v}{c} E_\gamma = \sqrt{2RkT}$$

При комнатной температуре для ^{119}Sn эта величина будет примерно равна $1,5 \cdot 10^{-2}$ эВ, что на порядок больше R . Происходит перекрытие линий испускания и поглощения вследствие доплеровского уширения. Это обеспечивает возможность резонансного поглощения гамма-лучей.

Испускание и поглощение в твердых телах

Совсем иначе обстоит дело в твердых телах --- в тех веществах с кристаллической решеткой, у которых энергия связи между атомами в решетке больше энергии отдачи. В таком случае при испускании/поглощении импульс в том или ином виде передается всем атомам в решетке, что часто вызывает ее колебания. Можно также сказать, что создаются кванты звуковых колебаний --- фононы.

В данной работе изучается \textbf{эффект Мессбауэра} --- испускание и поглощение γ -квантов без создания фононов (звуковых колебаний). Его вероятность выражается формулой

$$f = \exp - \frac{4\pi \langle u^2 \rangle}{\lambda^2}$$

где $\langle u^2 \rangle$ --- среднеквадратичное смещение ядер в процессе тепловых колебаний решетки (в направлении вылета γ -кванта), λ --- длина волны γ -излучения. Таким образом, вероятность упругого испускания (и поглощения) γ -квантов уменьшается с температурой (с ростом $\langle u^2 \rangle$) и с ростом энергии перехода (с уменьшением длины волны λ).

Расчеты показывают, что для наблюдения эффекта энергия фотонов должна быть порядка 200 кэВ. Температурный порог может быть разным; в изучаемых нами ядрах олова ^{119}Sn в соединении BaSnO_3 это возможно и при комнатной температуре. Для наблюдения эффекта гамма-излучение сначала пропускается через резонансный поглотитель со стабильными ядрами ^{119}Sn . Пройдя через него, излучение регистрируется сцинтилляционным спектрометром.

Мессбауэровская линия очень узка, и для наблюдения резонанса хватает скорости порядка миллиметра в секунду.

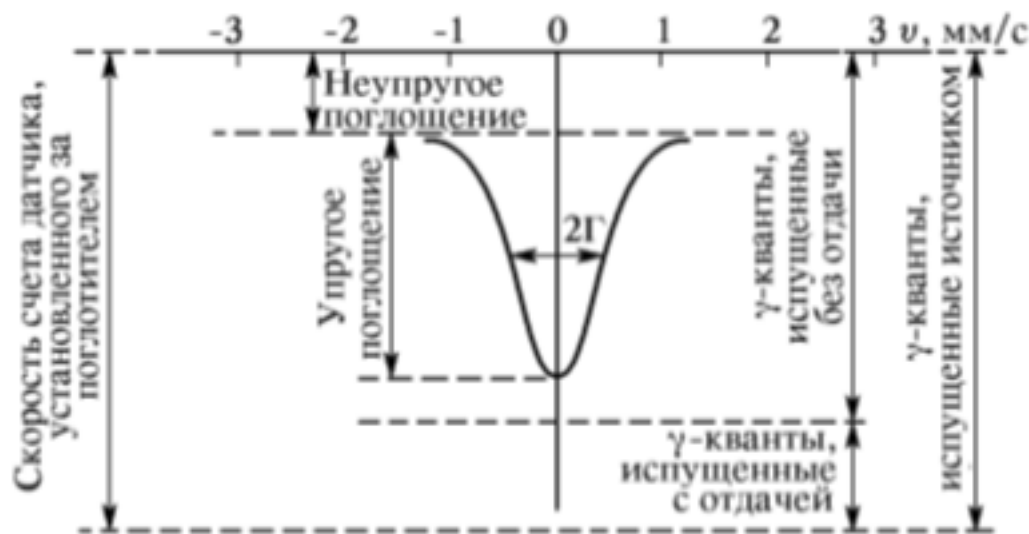


Рис. 3. Спектр упругого резонансного поглощения γ -квантов. Источник и поглотитель находятся в идентичных кристаллических решетках. Неупругое поглощение обусловлено главным образом взаимодействием γ -лучей с атомными электронами

Вообще говоря, при идентичных кристаллических решетках, линия испускания полностью перекрывается с линией поглощения, и максимальное поглощение наблюдается при нулевой скорости. Однако в химических сплавах (как наш BaSnO_3) из-за влияния электростатических сил происходит смещение максимума поглощения, и его можно "поймать" при отличной от нуля скорости. Такое смещение называется **химическим сдвигом**. Его можно рассчитать по формуле

$$v_p = \frac{\Delta E}{E_0} c$$

Для подсчета "амплитуды" эффекта Мессбауэра обычно определяется безразмерная величина

$$\epsilon(v) = \frac{N(\infty) - N(v)}{N(\infty) - N_{\text{ф}}}$$

где $N(v)$ --- скорость счета квантов, прошедших через поглотитель при некоторой скорости v , $N(\infty)$ --- скорость счета квантов при достаточно большой скорости, когда резонансное поглощение отсутствует, $N_{\text{ф}}$ --- скорость счета радиоактивного фона.

Измеряемая на опыте ширина резонансной линии $\Gamma_{\text{экс}}$ --- результат наложения линий источника и поглотителя. При тонких поглотителях и источниках и при отсутствии вибраций ширина линии равна удвоенной естественной ширине 2Γ .

Кривая на рис.3 задается формулой Брейта-Вигнера (лоренцева кривая):

$$\sigma(E) \propto \frac{(\Gamma/2)^2}{(E - E_0)^2 + (\Gamma/2)^2}$$

Экспериментальная установка

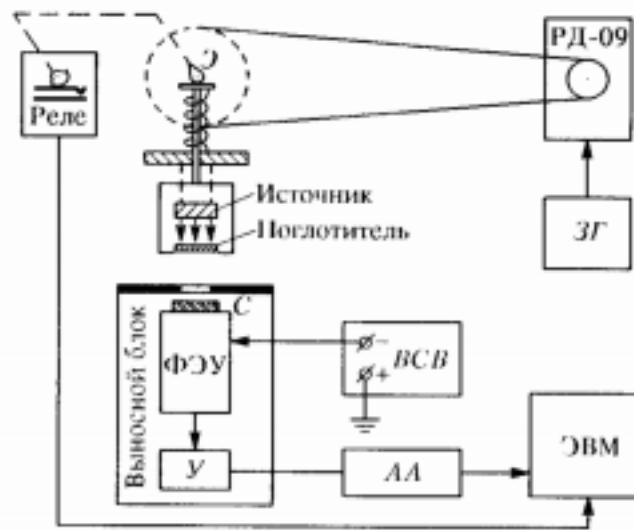


Рис. 4. Блок-схема установки для наблюдения эффекта Мессбауэра: Э — эксцентрик, С — сцинтилляционный кристалл NaI(Tl), У — усилитель, АА — одноканальный амплитудный анализатор, ЭВМ — персональный компьютер, ЗГ — звуковой генератор, РД-09 — двигатель с редуктором, ВССВ — высоковольтный стабилизированный выпрямитель

Основным источником результатов является компьютер (ЭВМ), на который приходят сигналы и данные от других частей установки.

Формулы:

$$\varepsilon(v_p) = \frac{N(\infty) - N(v_p)}{N(\infty) - N_\phi}$$

$$v_p = \frac{\Delta E}{E_0} c$$

In [11]:

```
import numpy as np
import scipy
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
from scipy.optimize import minimize
import seaborn as sns
from scipy.optimize import curve_fit
from IPython.display import display
```

In [2]:

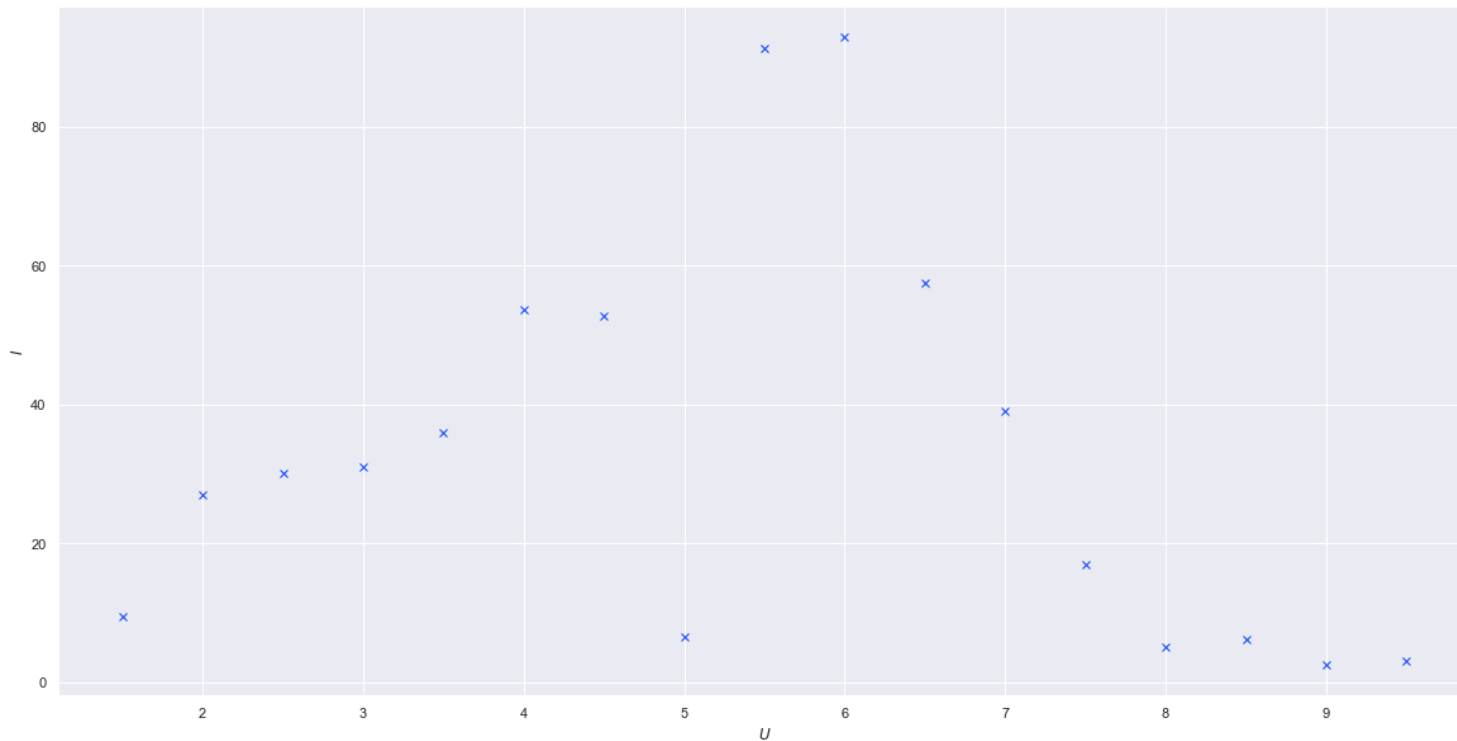
```
plt.rcParams['figure.figsize'] = 20, 10
plt.rcParams['axes.grid'] = True
sns.set(style="darkgrid", palette="bright")
plt.rc('legend', fontsize= 'large')
data_s = pd.read_excel('5.6.1.xlsx', 'Sample')
data_s
```

Out[2]:

	Low level	Intensity
0	0.0	0.0
1	0.5	47.0
2	1.0	6.6
3	1.5	9.4
4	2.0	27.0
5	2.5	30.0
6	3.0	31.0
7	3.5	36.0
8	4.0	53.6
9	4.5	52.8
10	5.0	6.6
11	5.5	91.2
12	6.0	92.8
13	6.5	57.4
14	7.0	39.0
15	7.5	17.0
16	8.0	5.0
17	8.5	6.2
18	9.0	2.6
19	9.5	3.0

In [3]:

```
x = []
y = []
for d in data_s.values.tolist()[3:]:
    x.append(d[0])
    y.append(d[1])
plt.ylabel(r'$I$', fontsize=12)
plt.xlabel(r'$U$', fontsize=12)
plt.plot(x, y, 'bx')
plt.show()
```



Энергии 23.8eV соответствует $U = 5.8B$.

Установим окно сцинтилляционного спектрометра, соответствующее ширине линии спектра излучения $4 \div 7B$ и проведем измерения резонансного поглощения:

In [4]:

```
for i in range(1, 5):
    data = pd.read_excel('5.6.1.xlsx', f'data{i}', dtype=float)
    display(data.transpose())
```

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V-	0.0	5.96	5.52	5.14	4.53	3.92	3.45	2.67	1.91	1.84	2.81
I-	407.3	345.10	345.40	346.50	350.00	355.40	347.70	353.00	346.10	339.50	377.70
V+	0.0	4.87	4.53	4.19	3.66	3.17	2.81	2.19	1.58	1.52	2.36
I+	407.6	362.20	372.90	370.70	362.10	348.60	351.20	339.70	363.60	406.70	353.60
bg	6.2	6.20	6.20	6.20	6.20	6.20	6.20	6.20	6.20	6.20	6.20

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V-	0.0	6.01	5.58	4.97	4.41	4.02	3.49	3.24	2.67	1.90	1.84
I-	260.6	224.10	230.10	229.70	223.70	235.10	217.20	229.40	225.90	221.80	227.30
V+	0.0	4.92	4.60	4.10	3.59	3.36	2.92	2.68	2.24	1.58	1.54
I+	260.6	223.30	228.40	232.80	225.30	228.20	202.80	193.70	198.90	217.50	221.20
bg	9.9	9.90	9.90	9.90	9.90	9.90	9.90	9.90	9.90	9.90	9.90

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V-	0.0	5.97	5.61	5.13	4.75	4.42	3.90	3.41	2.76	1.85	2.28
I-	68.2	72.20	71.20	78.10	71.10	60.70	64.80	66.60	66.80	65.80	67.10
V+	0.0	4.96	4.55	4.27	3.88	3.58	3.25	2.84	2.26	1.52	1.88
I+	68.2	70.10	64.60	69.00	64.90	66.00	62.60	53.50	49.60	67.90	56.70
bg	6.0	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V-	0.00	6.12	5.07	5.41	4.97	4.44	3.84	3.27	2.45	1.86	1.86
I-	465.40	688.80	700.90	701.20	673.00	695.90	821.20	727.30	684.80	664.00	655.30
V+	0.00	5.08	4.81	4.44	4.09	3.67	3.17	2.75	2.01	1.53	1.53
I+	465.40	709.90	706.70	721.90	708.00	713.00	719.80	806.70	706.90	690.80	691.30
bg	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75

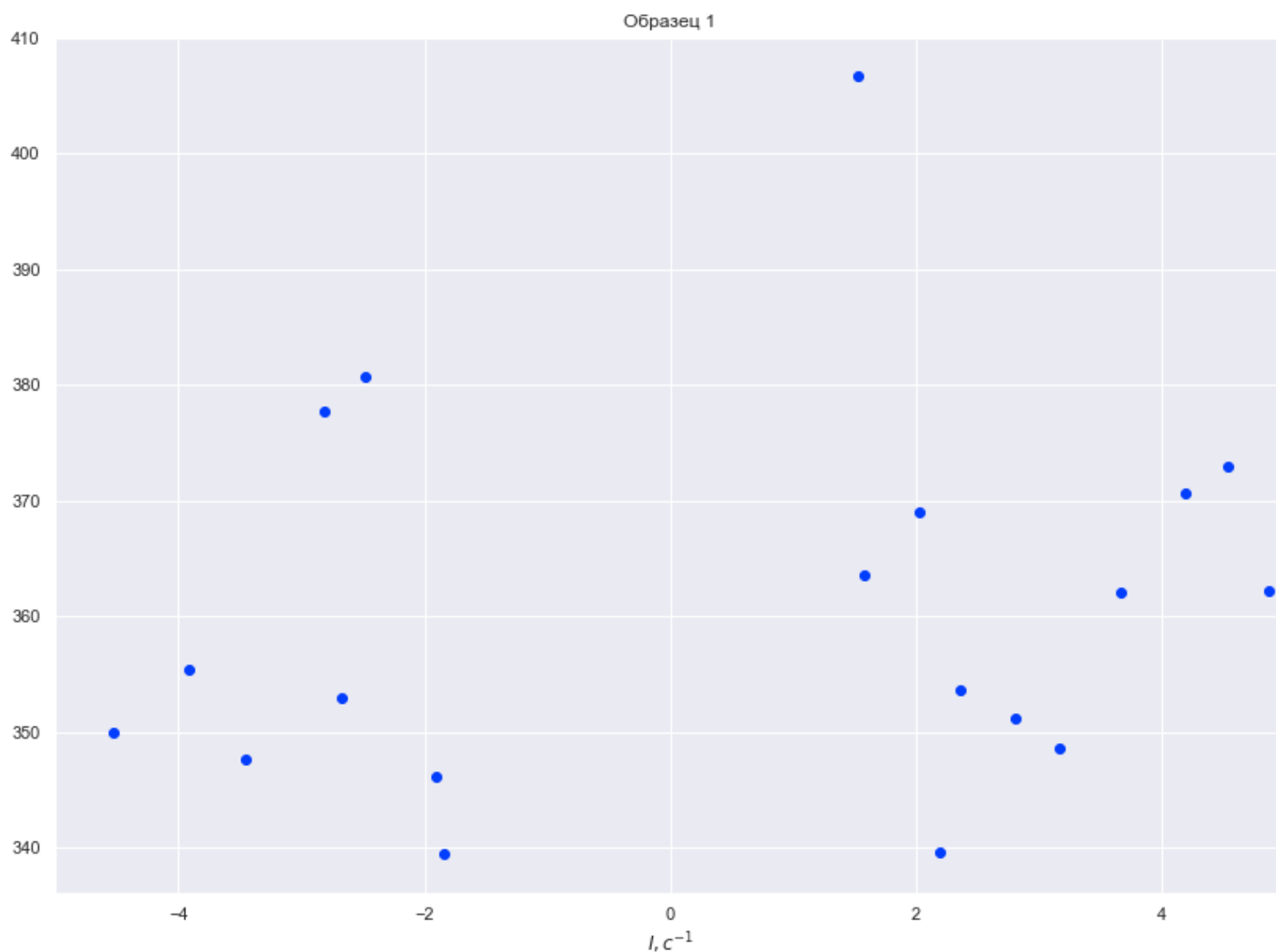
Построим графики I от ν и найдем по ним ε , Γ и ΔE_x .

In [36]:

```
x = []
y = []
data = pd.read_excel('5.6.1.xlsx', f'data{1}', dtype=float)
x = np.hstack((-data['V-'][1:], data['V+'][1:]))
y = np.hstack((data['I-'][1:], data['I+'][1:]))
plt.figure(figsize= (14,10))
plt.xlim(-5, 5)
plt.xlabel('$v$, MM/C$')
plt.xlabel('$I$, C^{-1}$')
plt.title(f'Образец {1}')
plt.plot(x, y, 'o')
```

Out[36]:

[<matplotlib.lines.Line2D at 0x113f2e5c0>]



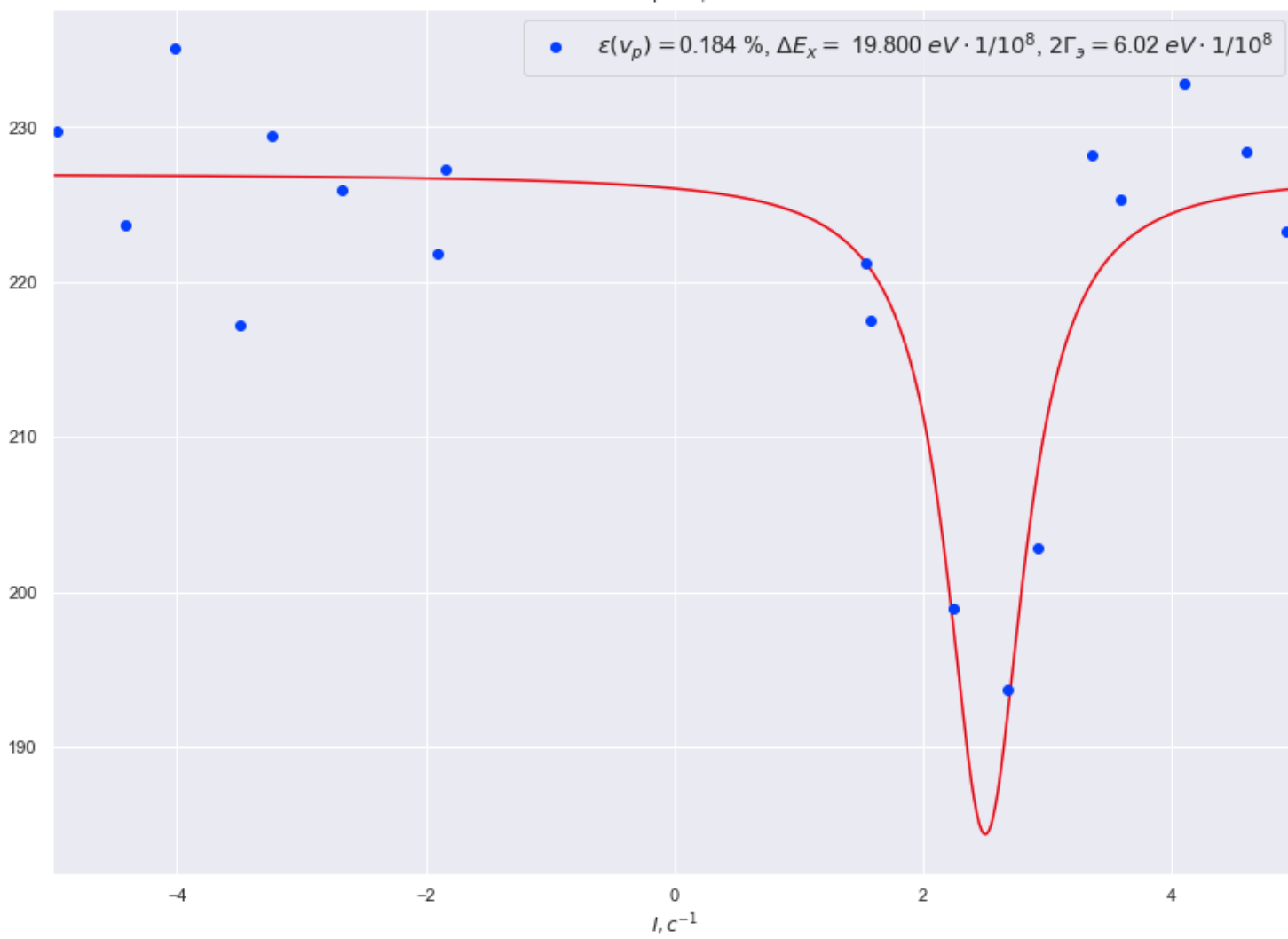
In [38]:

```
def f(x, y0, xc, w, A):
    return y0 + (2*A/np.pi)*(w/(4*(x-xc)**2+w**2))
```

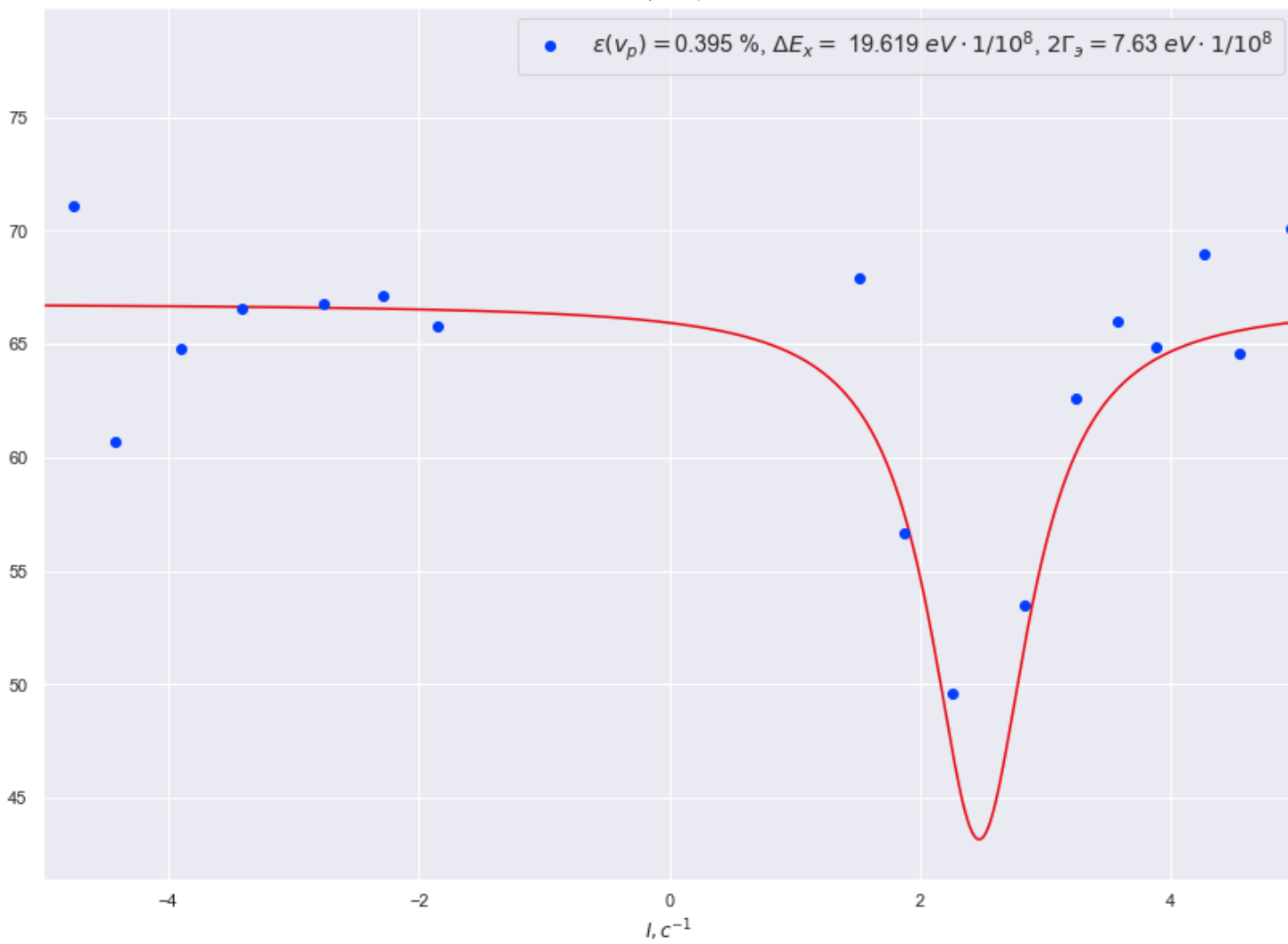

In [61]:

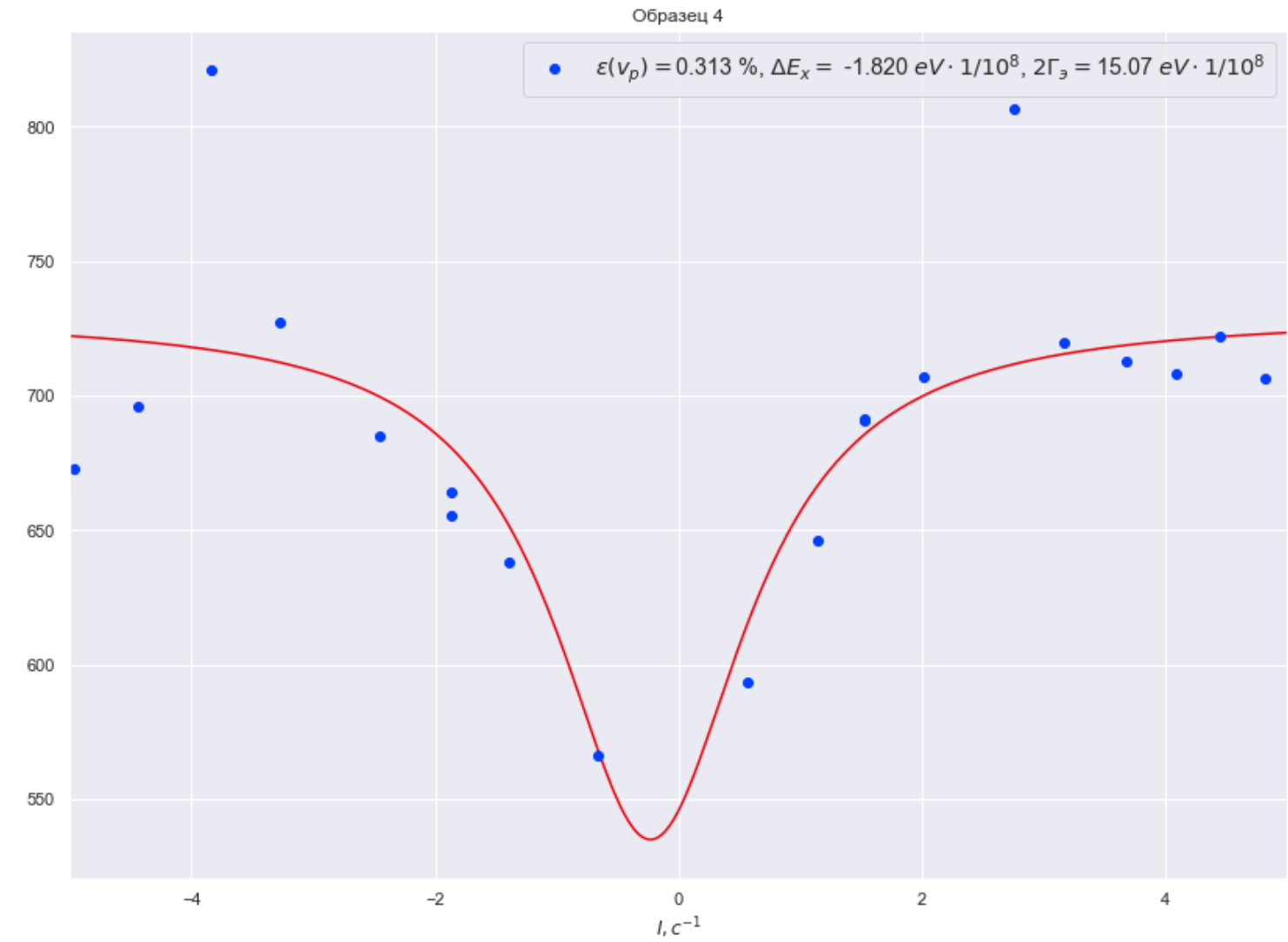
```
Gamma =[6.02, 7.63, 15.07]
eng = [19.8, 19.619, -1.82]
popts = [[227, 2.5, 0.76, -50.9], [66.8, 2.473, 0.962, -35.7], [729.64, -0.23,
1.9, -580.9]]
for i in range(2, 5):
    x = []
    y = []
    data = pd.read_excel('5.6.1.xlsx', f'data{i}', dtype=float)
    x = np.hstack((-data['V-'][1:], data['V+'][1:]))
    y = np.hstack((data['I-'][1:], data['I+'][1:]))
    bg = data['bg'][0]
    Vp = np.min(y)
    ivp, = np.where(y == Vp)[0]
    Vinf = np.max(y)
    iinf, = np.where(y == Vinf)[0]
    ch = eng[i-2]
    eps = abs((y[ivp] - y[iinf]) / (bg - y[iinf]))
    #print(eps, ch)
    #popt, pcov = curve_fit(f, x, y,maxfev = 10**5)
    popt = popts[i-2]
    plt.figure(figsize= (14,10))
    plt.xlim(-5, 5)
    plt.xlabel('$v, \text{MM/C}$')
    plt.xlabel('$I, \text{C}^{-1}$')
    plt.title(f'Образец {i}')
    plt.plot(np.linspace(-5,5,1000), f(np.linspace(-5,5,1000), *popt), 'r-')
    plt.plot(x, y, 'o',
        label='$\vartheta(v_p)=\text{ {:.3f} } \%, \Delta E_x =\text{ {:.3f} } \text{ eV } \cdot$
1/10^8$, $\Gamma_\vartheta=\text{ {} } \text{ eV } \cdot 1/10^8$ '.format(eps, ch, Gamma[i-2]))
    plt.legend()
```

Образец 2



Образец 3





Результаты:

substance	2	3	4
$2\Gamma, eV$	$6.02 \cdot 10^{-8}$	$7.63 \cdot 10^{-8}$	$16.07 \cdot 10^{-8}$
$\Delta E, eV$	$19.8 \cdot 10^{-8}$	$19.619 \cdot 10^{-8}$	$-1.82 \cdot 10^{-8}$
$\varepsilon(V_p)$	0.184%	0.395%	0.313%

Вывод: Эффект резонансного поглощения γ -квантов может применяться для исследования структур, содержащих определенные изотопы.

Уширение линии может быть связано с неравномерностью скорости движение поглотителя относительно источника, с толщиной поглотителя (вблизи максимума линии поглощаются даже в тонком слое).

In []: