

Подготовка эксперимента по комптоновскому рассеянию на ядрах водорода и гелия с помощью активной мишени

НИЦ КИ - ПИЯФ, ОФВЭ, ЛБФ

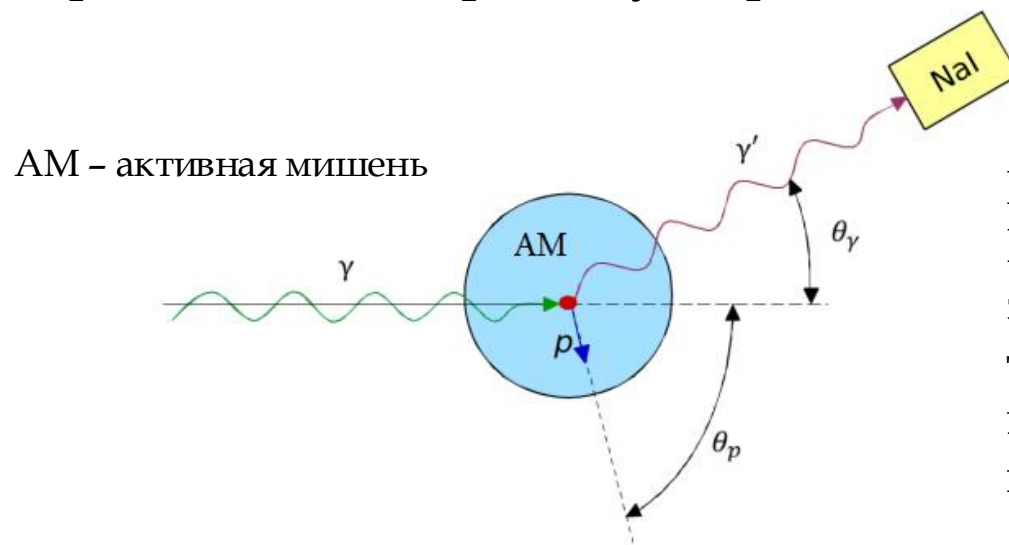
Арутюнова Анастасия

Схема эксперимента

Поляризуемость нуклона – одно из фундаментальных свойств нуклона, которое характеризует степень его деформации под действием внешнего электромагнитного поля [1].

Поляризуемость можно определить при измерении зависимостей дифференциальных сечений комптоновского рассеяния от энергии и угла рассеяния фотонов θ_γ

Схема эксперимента:



Преимущество:
Камера позволяет определить энергию, угол протона отдачи и точку взаимодействия, возникающего в объеме между катодом и сеткой.

Рис. 1 Схема планируемого эксперимента по измерению поляризуемости нуклонов

Данные по поляризуемости протона

* Таблица со всеми данными на сл. 17

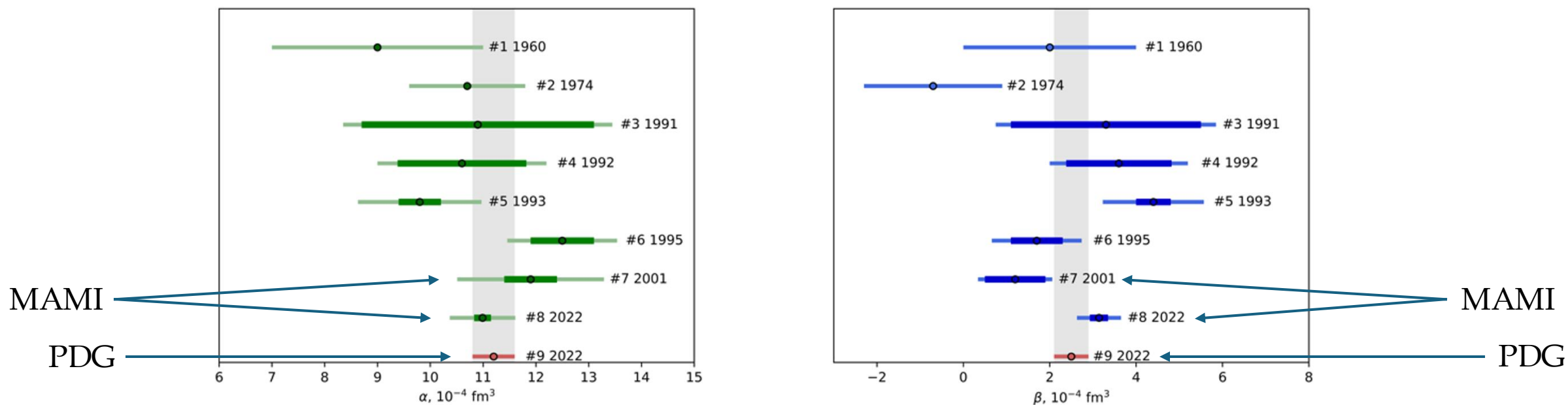


Рис. 2 Значения α и β в различных экспериментах

MAMI (2001)	$\alpha = 11.9 \pm 0.5 \pm 1.3$	$\beta = 1.2 \pm 0.7 \pm 0.3$
PDG (2010)	$\alpha = 12.0 \pm 0.6$	$\beta = 1.9 \pm 0.5$
PDG (2022)	$\alpha = 11.2 \pm 0.4$	$\beta = 2.5 \pm 0.4$
MAMI (2022)	$\alpha = 10.99 \pm 0.16 \pm 0.60$	$\beta = 3.14 \pm 0.21 \pm 0.47$

=> Значения требуют уточнения

Задачи

Изучение статистических и систематических ошибок в определении электрической (α) и магнитной (β) поляризуемостей;

Исследование характеристик активной мишени (ионизационная камера):

- Исследование электроники;
- Исследование энергетических спектров;
- Проверка энергетической калибровки;
- Измерение скорости дрейфа электронов;
- Определение относительной энергии образования электрон-ионных пар.

LET Theorem

LET позволяет точно рассчитать сечения рассеяния для энергий меньше 100 МэВ [2]:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{LET} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Point} - \rho$$

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Point} = \frac{1}{2} \left(\frac{e}{m}\right)^2 \left(\frac{E_\gamma}{E_{\gamma'}}\right)^2 \left(1 + \cos^2\theta_\gamma + \frac{E_\gamma E_{\gamma'}}{m^2} \times \right. \\ \left. \times ((1 - \cos\theta_\gamma)^2 + a_0 + a_1 \cos\theta_\gamma + a_2 \cos^2\theta_\gamma))\right)$$

$$\rho = \frac{e^2}{m} \left(\frac{E_\gamma}{E_{\gamma'}}\right)^2 (E_\gamma E_{\gamma'}) \left(\frac{\alpha + \beta}{2} (1 + \cos\theta_\gamma)^2 + \frac{\alpha - \beta}{2} (1 - \cos\theta_\gamma)^2\right)$$

$$a_0 = 2k + \frac{9}{2}k^2 + 3k^3 + \frac{3}{4}k^4$$

$$a_1 = -4k - 5k^2 - 2k^3$$

$$a_2 = -4k - 5k^2 - 2k^3$$

Параметры $a_{0,1,2}$ задаются с помощью зависимости от аномального магнитного момента

Расчет статистических и систематических ошибок

1. По формуле LET с шагом 4 МэВ рассчитываем значение теоретического дифференциального сечений;
2. По нормальному закону с ошибкой, зависящей от энергии, «разбрасываем» экспериментальное значение

$$\sigma_i = \sigma \cdot \sqrt{\frac{E_i}{E_f}}, \quad \sigma = 0.3\%, \quad E_f = 100 \text{ МэВ}, \quad E_i = E_\gamma = 20 \dots 100 \text{ МэВ}$$

3. С помощью метода Левенберга-Марквардта (МНК) и с введением параметра нормировки определяем α и β ;
4. Для рассмотрения ошибок по углу и энергии изменяем их значения и проводим сравнение.

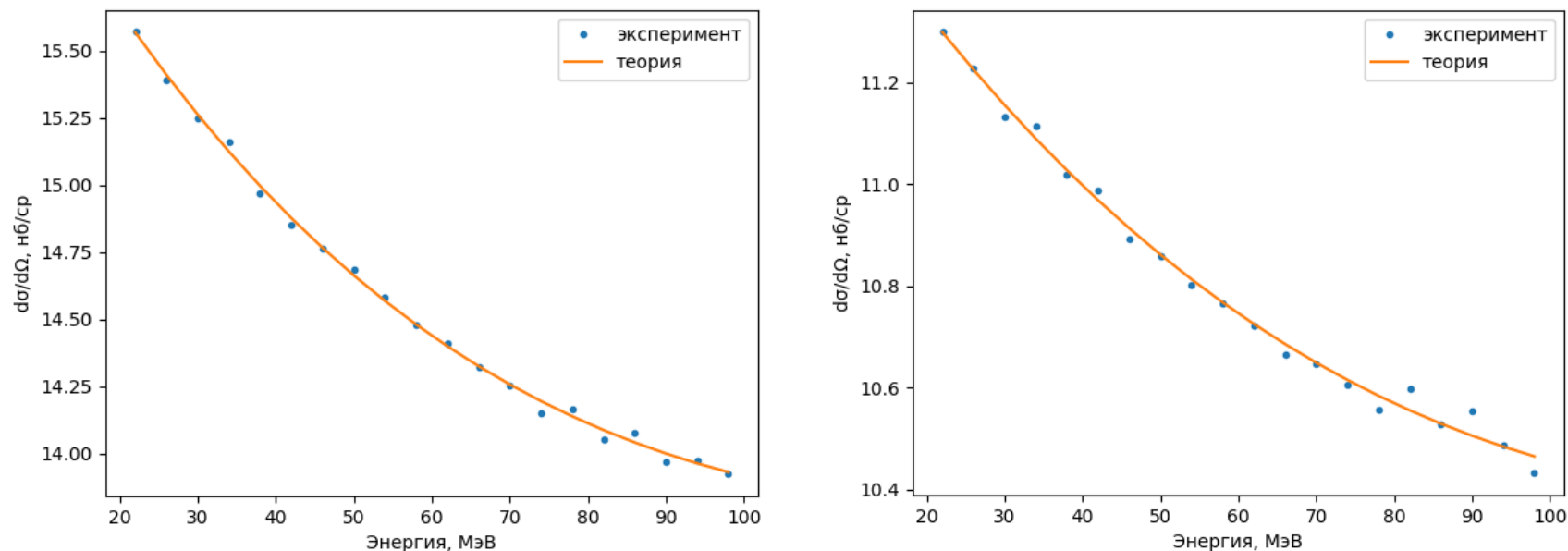


Рис. 3 Теоретические и смоделированные сечения рассеяния при $\theta_\gamma = 130^\circ$ (слева) и $\theta_\gamma = 90^\circ$ (справа) от энергии E_γ

Ошибки, рассчитанные для предлагаемой установки

	$\Delta\alpha \cdot 10^{-4} \text{ фм}^3$	$\Delta\beta \cdot 10^{-4} \text{ фм}^3$
Ошибка при статистике $8 \cdot 10^6$ событий	0.07	0.11
Отклонение при ошибке по углу 0.3°	0.05	0.11
Отклонение при ошибке по энергии 1.4 МэВ	0.07	0.07
Отклонение при ошибке в измерении энергии 2%	0.007	0.008

Mainz, 2022: $\Delta\alpha = [0.16_{stat} \pm 0.60_{syst+mod}] \cdot 10^{-4} \text{ фм}^3$

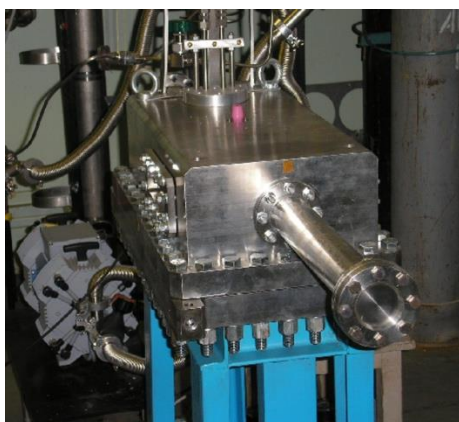
$\Delta\beta = [0.21_{stat} \pm 0.47_{syst+mod}] \cdot 10^{-4} \text{ фм}^3$

Активная мишень: $\Delta\alpha = [0.07_{stat} \pm 0.11_{syst}] \cdot 10^{-4} \text{ фм}^3$

$\Delta\beta = [0.11_{stat} \pm 0.15_{syst}] \cdot 10^{-4} \text{ фм}^3$

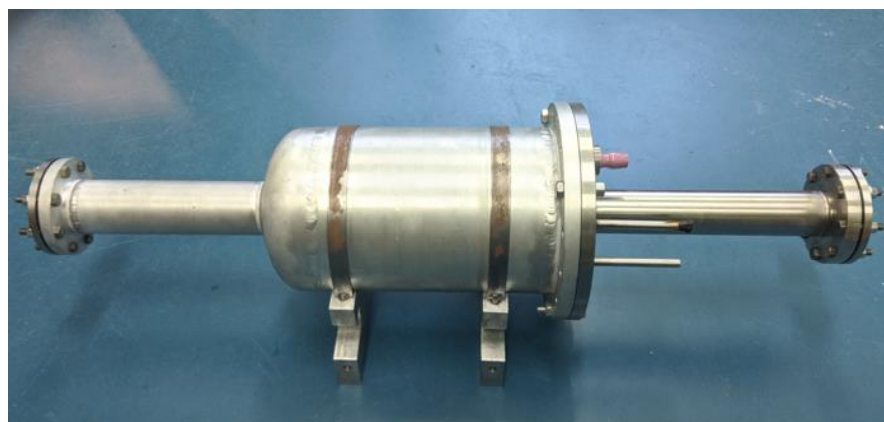
=> новый метод измерения поляризуемости протона показывает большую точность при проведении эксперимента

Ионизационные камеры



COMPTON

- Объем 10 л
- Рабочее давление 100 бар



АСТАМ

- Объем 10 л
- Рабочее давление 25 бар



АСТАФ2

- Объем 80 л
- Рабочее давление 10 бар

Свойства ИК АСТАФ2

- Рабочий газ: He, Ar, H_2, D_2, CH_4 ;
- Давление: 0.1 - 10 бар;
- Толщина Al стенок 8 мм;
- Высокая (~100%) эффективность регистрации с энергетическим разрешением 20-30 кэВ;
- Регистрация частиц отдачи в энергетическом диапазоне 0.3-15 МэВ;
- Возможность регистрации различных типов частиц отдачи: (p, d, H_3, He_3, \dots) ;
- Восстановление координаты точки взаимодействия с точностью 0.5 мм;
- Определение полярного угла частицы отдачи с точностью порядка 10 мрад;
- Определение азимутального угла ($\sigma \approx 6^\circ$);
- Чтение сигнала со всех анодов и катода;
- Временное разрешение 40-60 нс.

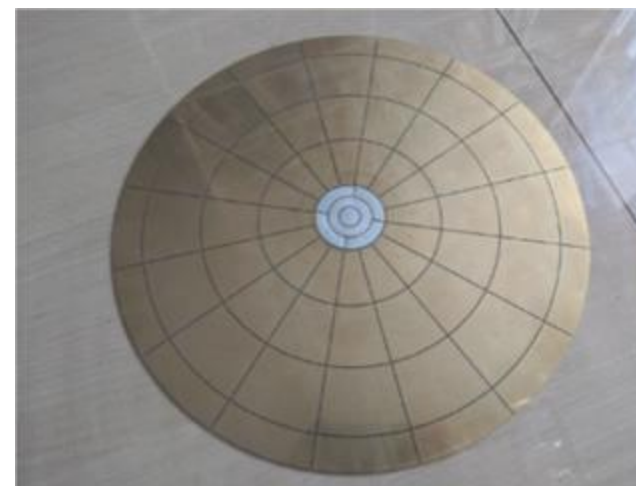
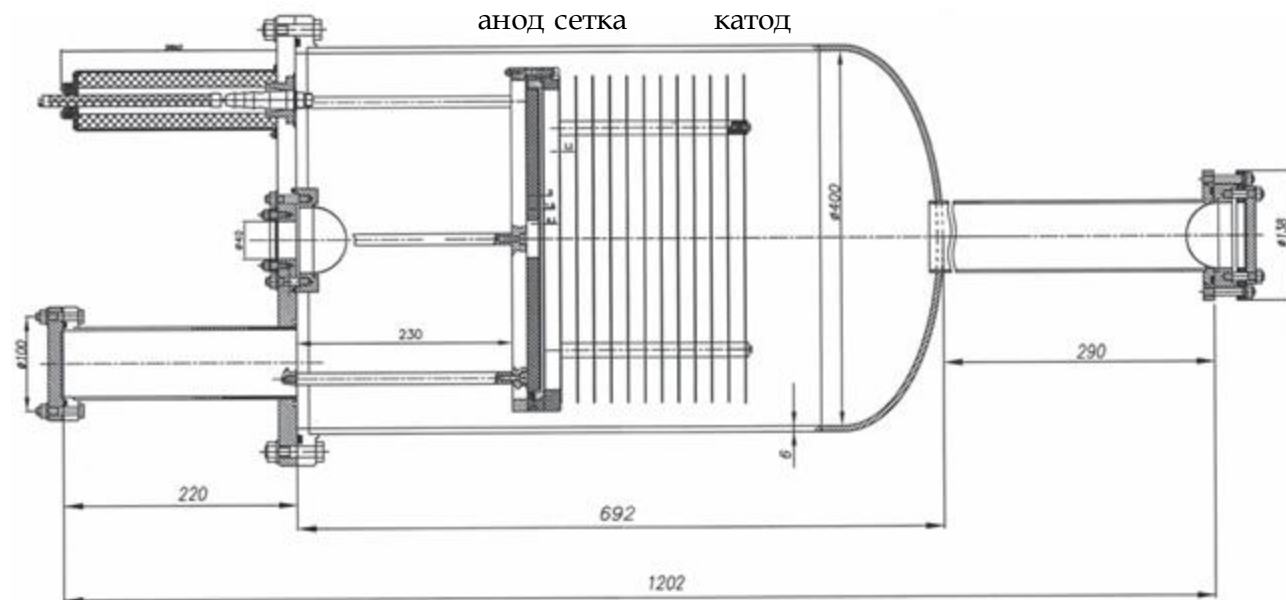


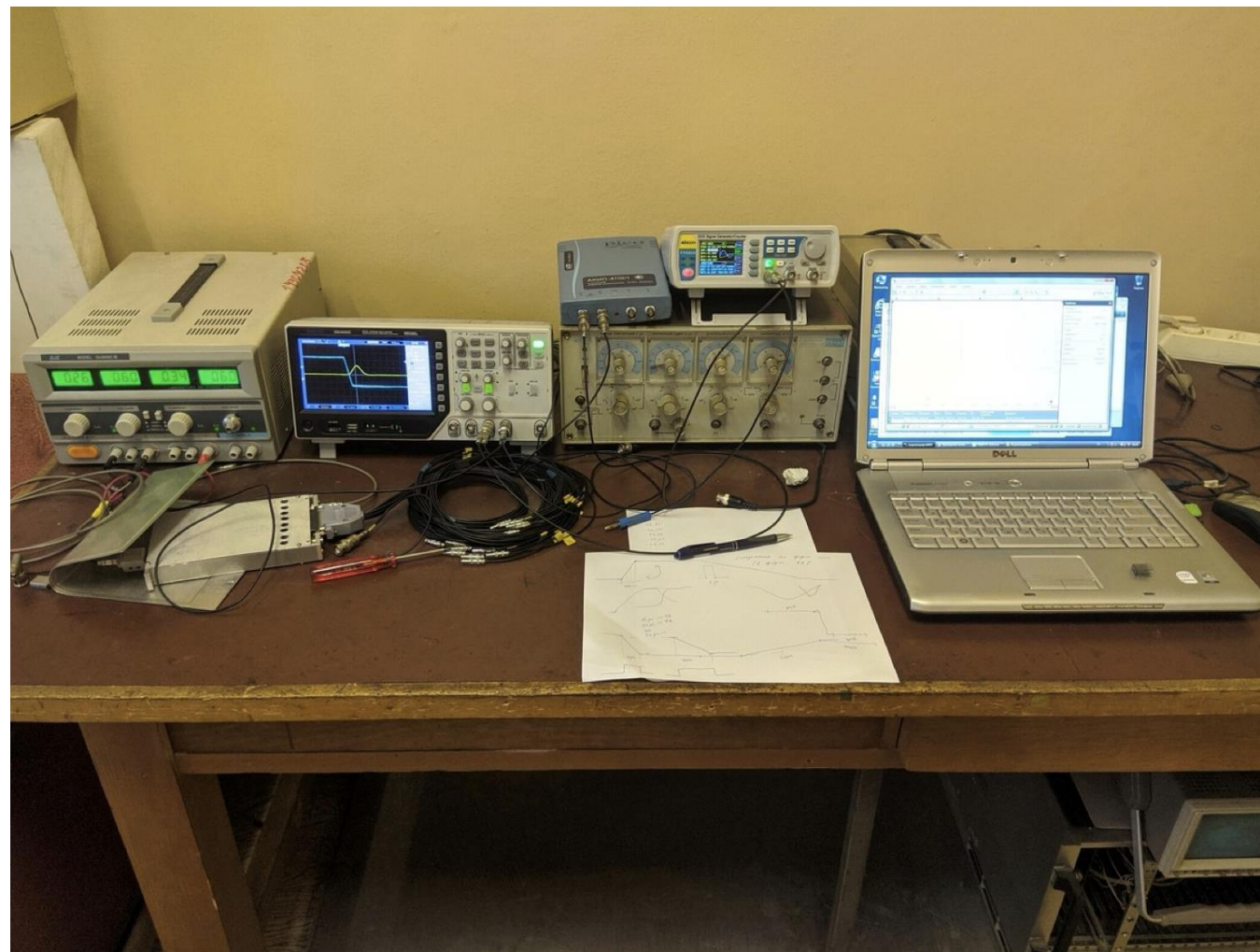
Рис. 4 Вид сегментированной анодной плоскости

Стенд для изучения электроники

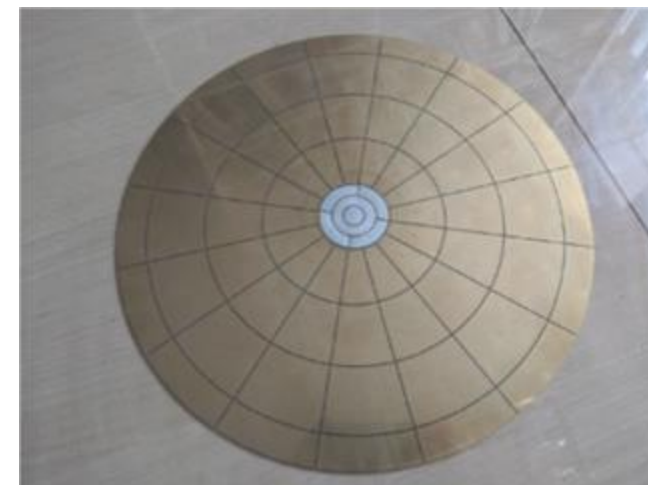
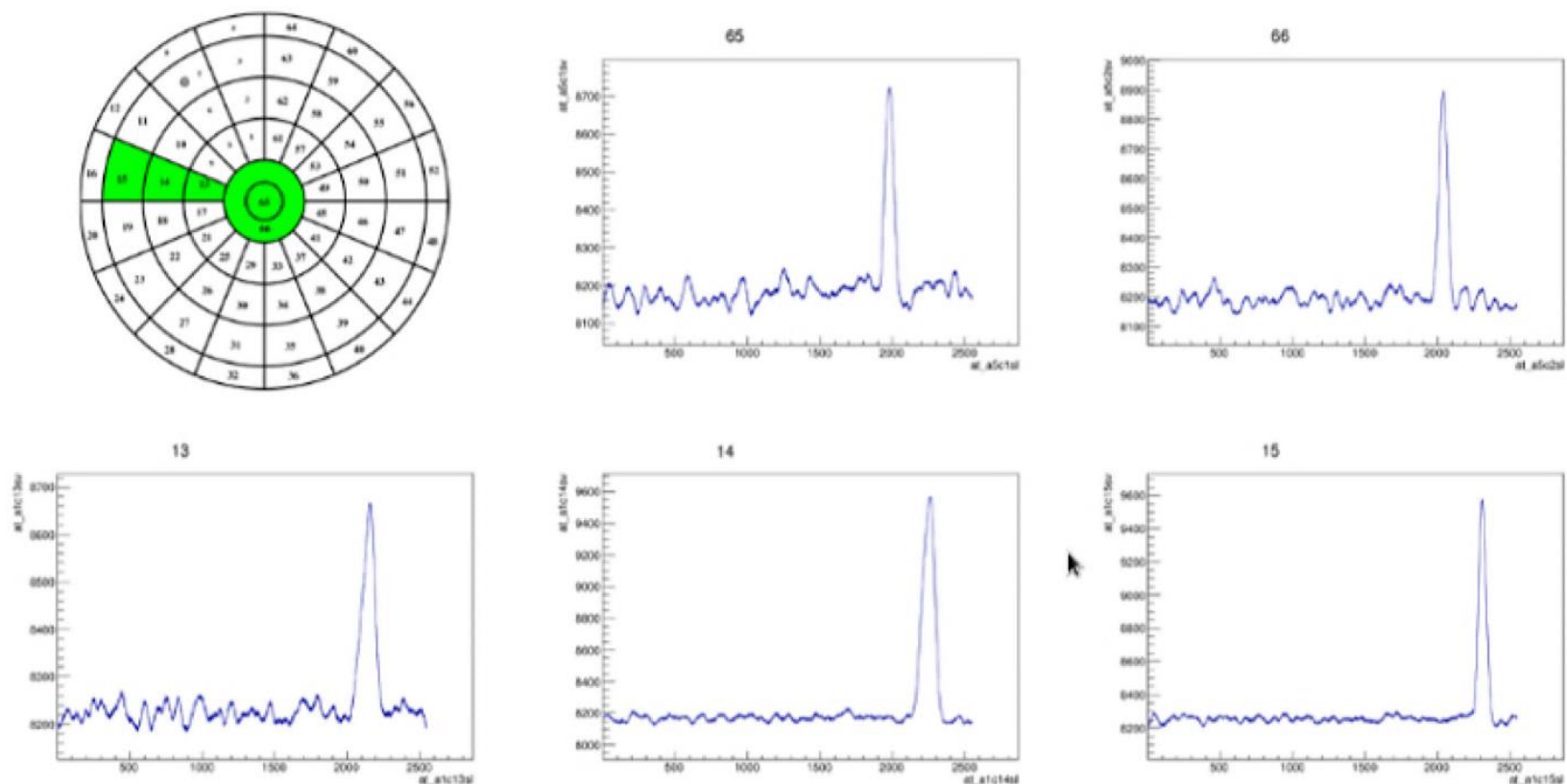
Рис. 5 Стенд для исследования электроники

Задачи:

- Калибровка усилителя;
- Анализ энергетического разрешения;
- Относительная калибровка каналов усилителя.



Пример регистрации трека протона в ионизационной камере



Благодаря аксиально-симметричной камере мы регистрируем частицы отдачи во всех направлениях. После обработки сигнала у нас есть данные о времени, длительности, энергии, амплитуде и точке взаимодействия.

Рис. 6 Последовательность сигналов от трека частицы отдачи (протона (GSI, 2014, пучок Ni-58 на водороде, 10 атм))

Исследуемые сигналы от альфа-частиц (Am-241, 5.5 МэВ)

Задачи:

- Проверка энергетической калибровки;
- Определение относительной энергии ионизации: Ar $w = 27.7$ эВ
He + 5%N₂ $w = 36$ эВ

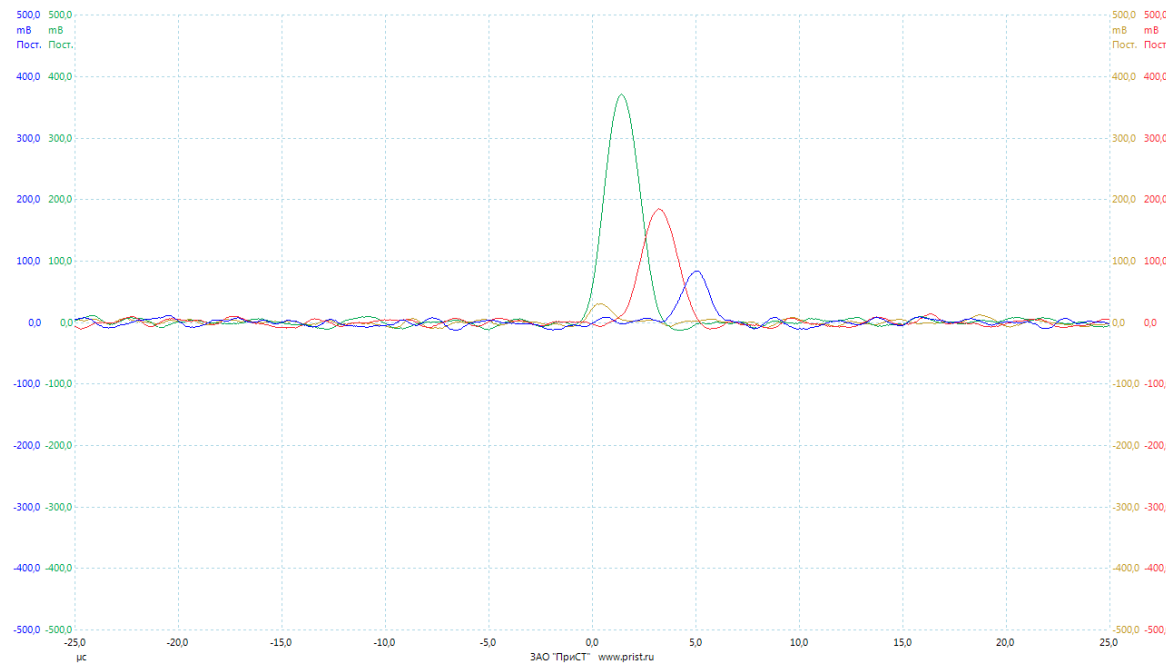


Рис. 7 Сигналы от альфа частиц на 4-х анодах, записанные на АЦП

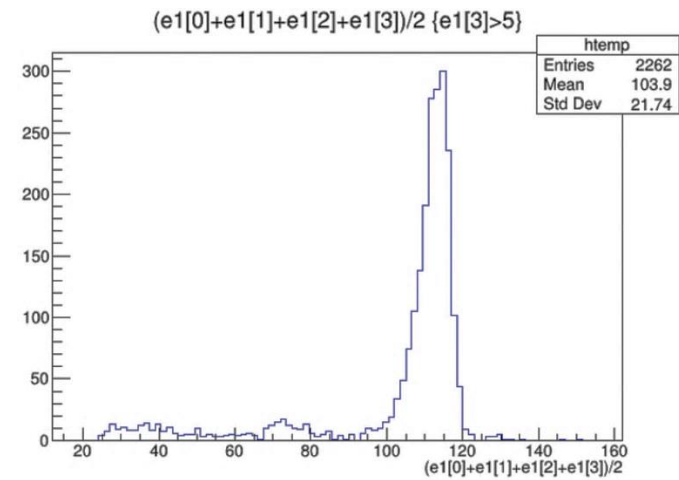


Рис. 8 Пример энергетического спектра альфа-частиц Am-241 (Ar, 0.34 атм)

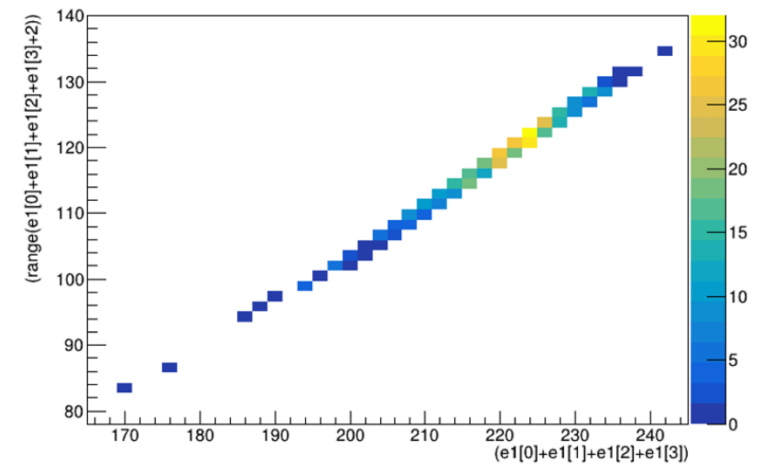


Рис. 9 Корреляция пробег-энергия

Измерение скорости дрейфа электронов

Альфа-источник расположен на катоде (Рис. 11).
Разность времен прихода сигналов с катода и анода позволяет измерить скорость дрейфа (Рис. 10 и 12).

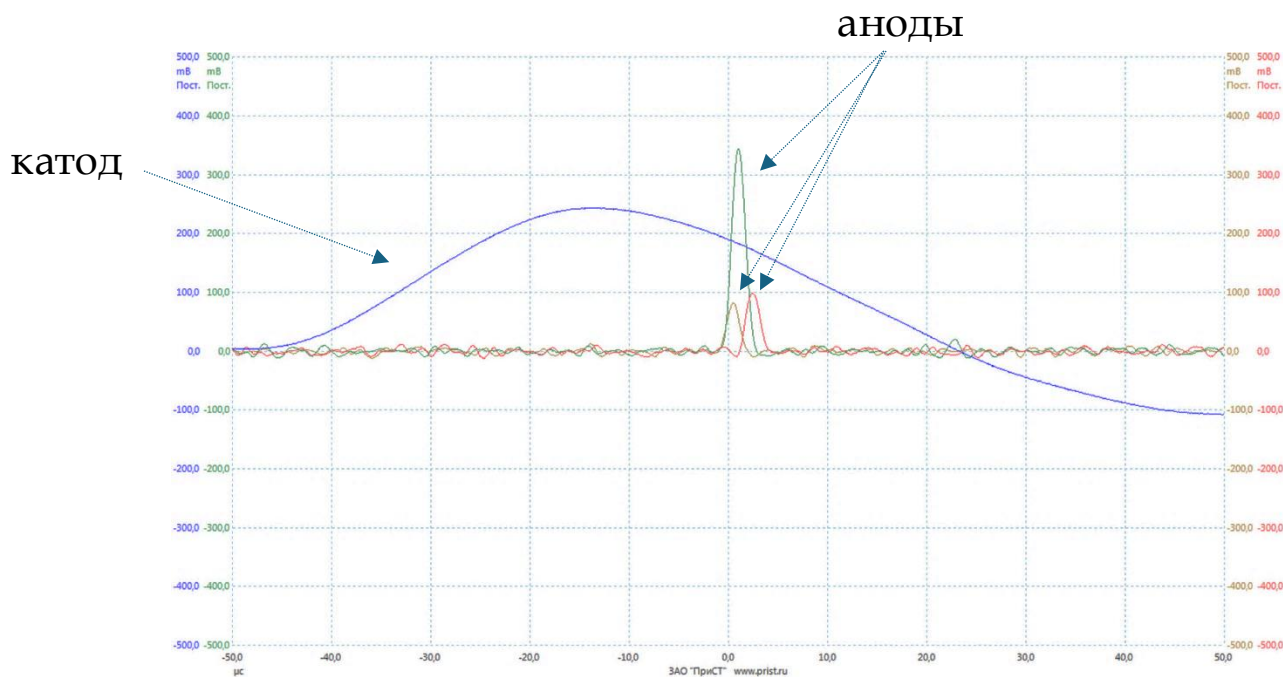


Рис. 10 Сигналы от альфа частиц на катоде (синий) и 3-х анодах, записанные на АЦП

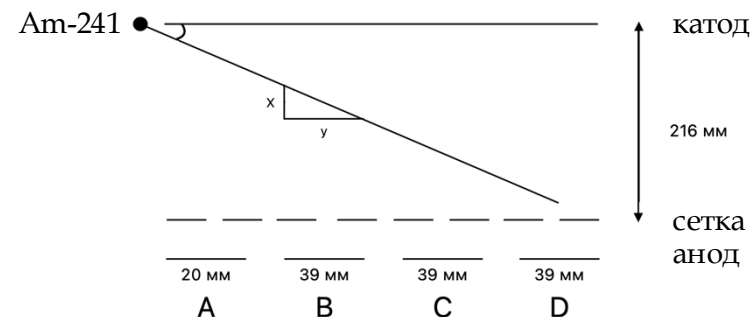


Рис. 11 Иллюстрация трека от альфа частицы и геометрические параметры анодной плоскости

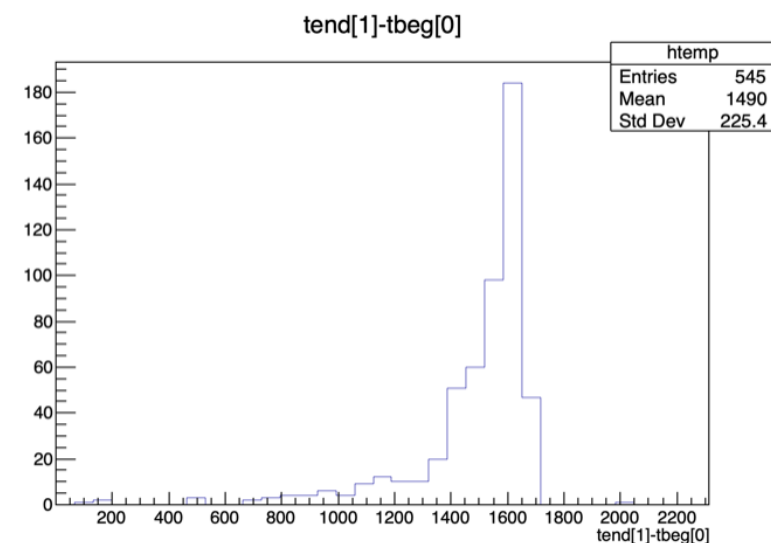
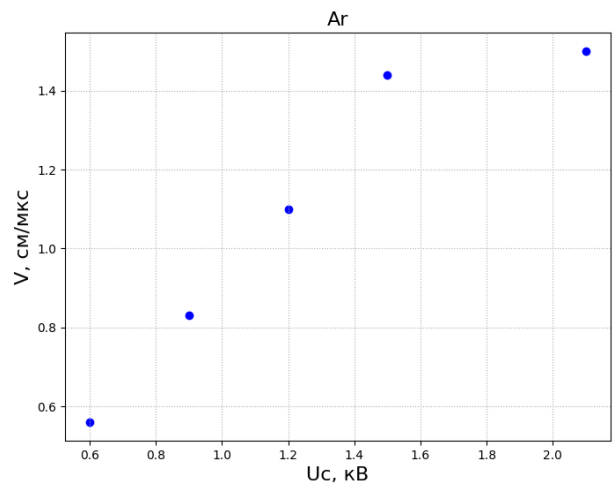


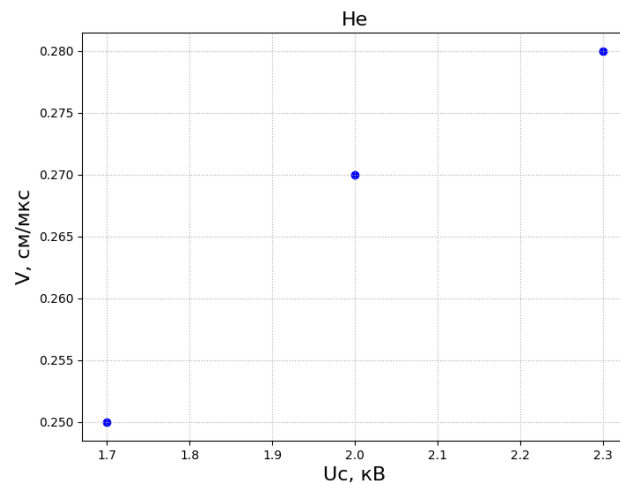
Рис. 12 Пример временного спектра альфа-частиц Am-241

Исследование скорости дрейфа электронов

От напряжения

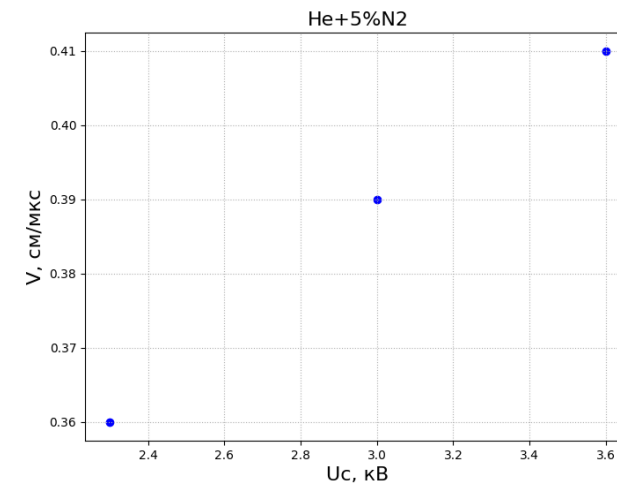


№	Uс, кВ	E/p, В/мм см Hg	V, см/мкс
1	0.6	0.1	0.56
2	0.9	0.14	0.83
3	1.2	0.2	1.1
4	1.5	0.25	1.44
5	2.1	0.35	1.5



№	Uс, кВ	E/p, В/мм см Hg	V, см/мкс
1	1.7	0.053	0.25
2	2.0	0.064	0.27
3	2.3	0.075	0.28

Значения в He хорошо совпадают с литературой.



№	Uс, кВ	E/p, В/мм см Hg	V, см/мкс
1	2.3	0.075	0.36
2	3.0	0.096	0.39
3	3.6	0.12	0.41

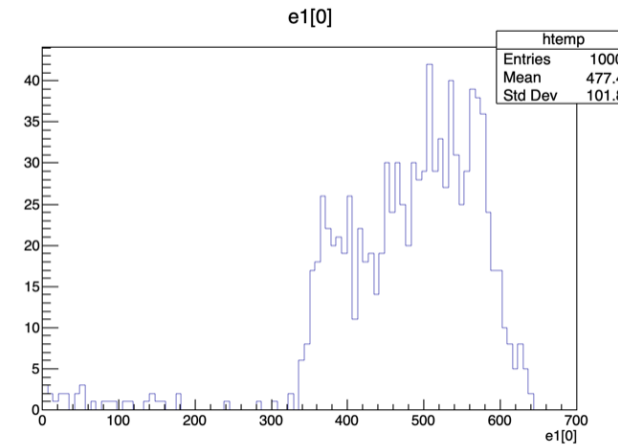
В Ar при давлении 0.34 атм с течением времени из стенок камеры выделялся воздух (~3%) и наблюдалось значительное повышение скорости дрейфа электронов (в чистом аргоне при $E/p = 0.2$: $V = 0.28$ см/мкс). При высоком давлении значения совпадают. При давлении 1.2 атм и $E/p = 0.1$ скорость $V = 0.28$ см/мкс

Энергетические спектры

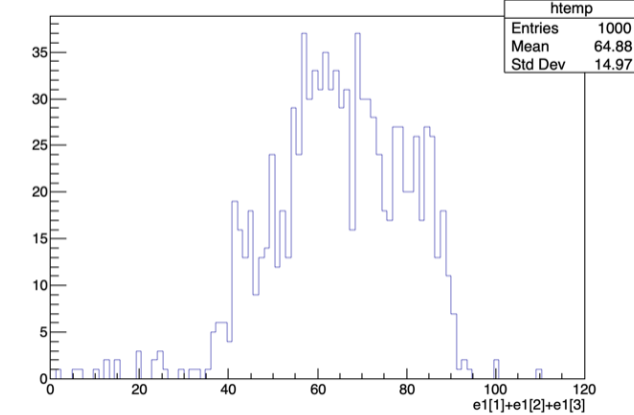
Задача:

- Изучение эффектов прилипания – процесса захвата электрона атомом или молекулой

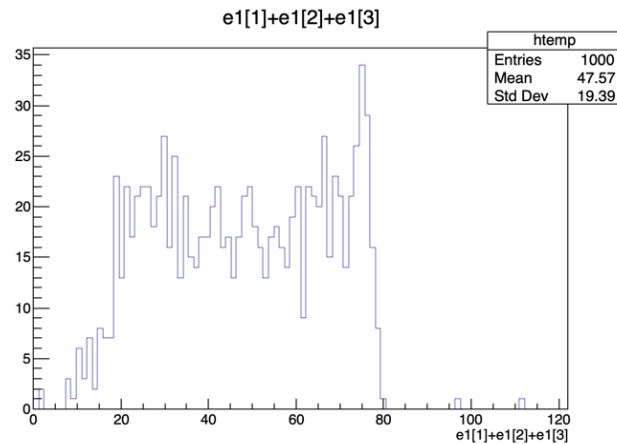
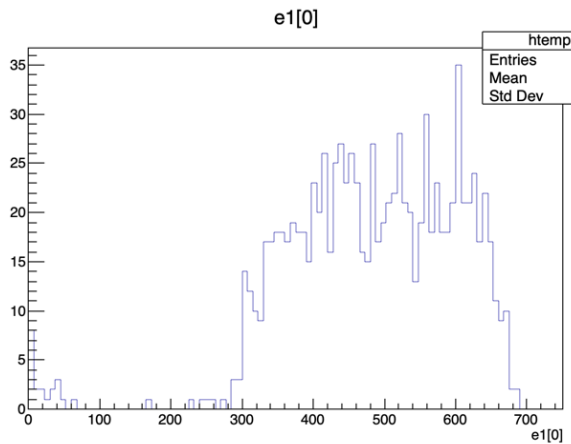
He



$e1[1]+e1[2]+e1[3] \{e1[1]+e1[2]+e1[3]<300\}$



He + 5% N₂



Ar

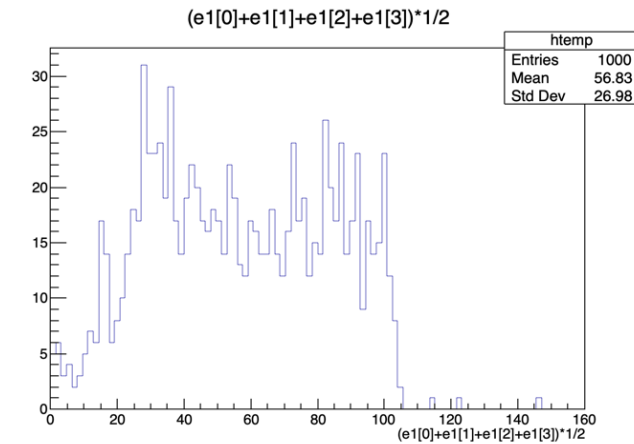
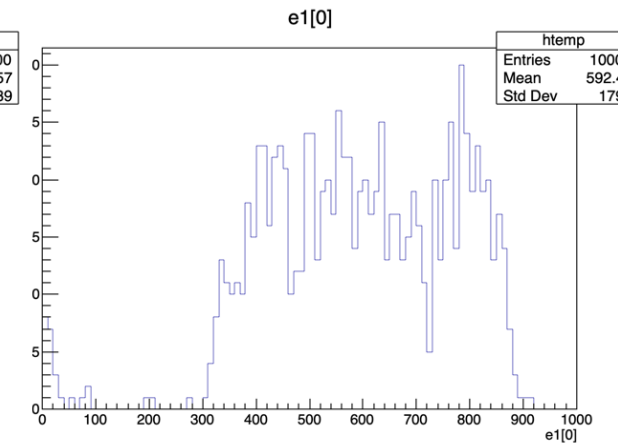


Рис. 14 Распределение энергий от альфа-источника Am-241 (5.5 МэВ) на катоде (слева) и 3-х анодах (справа). К = 7.15

Заключение и планы

Сделано:

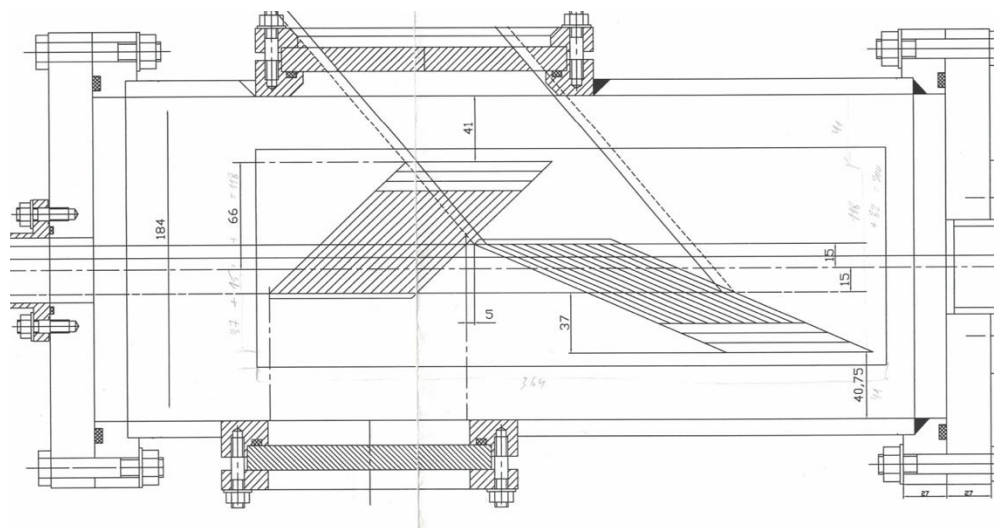
1. Выполнено исследование систематических и статистических ошибок. Результат исследования показал преимущество экспериментов с использованием активной мишени в определении поляризуемости;
2. Было выполнено исследование электроники с помощью генератора импульсов;
3. Измерены скорости дрейфа электронов в Ar, He и He+5%N₂. В Ar обнаружен эффект увеличения скорости дрейфа (в 4 раза) при наличии 3% воздуха. В чистых аргоне и гелии результаты измерения практически совпадают с известными данными;
4. Была проведена калибровка энергетической шкалы с помощью альфа-источника;
5. Были измерены относительные энергии на образование электрон-ионных пар (w) в Ar: $w = 27.7$ эВ и He+5%N₂: $w = 36$ эВ;
6. Был исследован эффект прилипания к кислороду в различных газах.

Планы подготовки эксперимента по комптоновскому рассеянию 2024/2025:

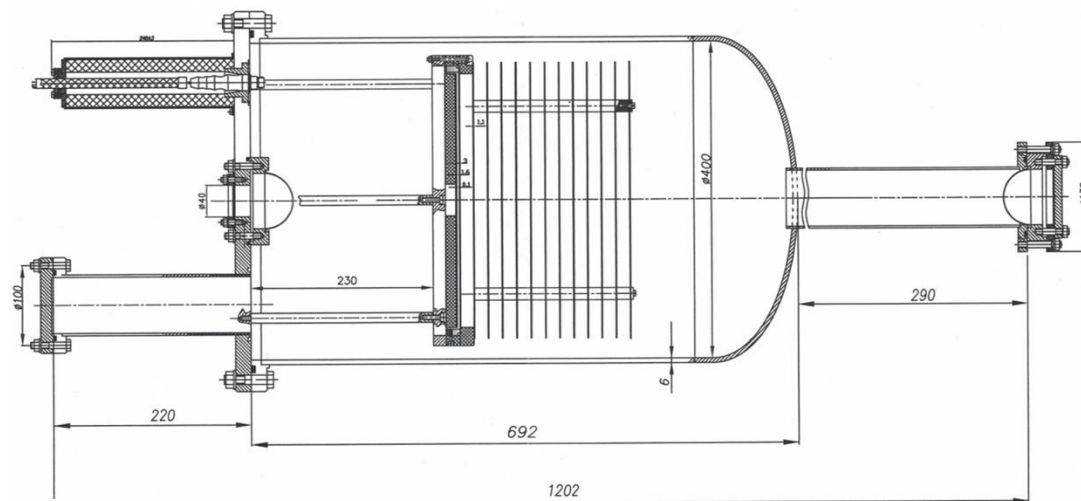
1. Продолжить исследование электроники для активных мишеней (калибровка усилителей);
2. Продолжить исследование характеристик активных мишеней (АСТАF2, СОМРТОН) (выполнить измерения на водороде);
3. Подготовить проект по созданию гамма-детектора и начать подготовку программ по моделированию гамма-детектора.

Чертежи

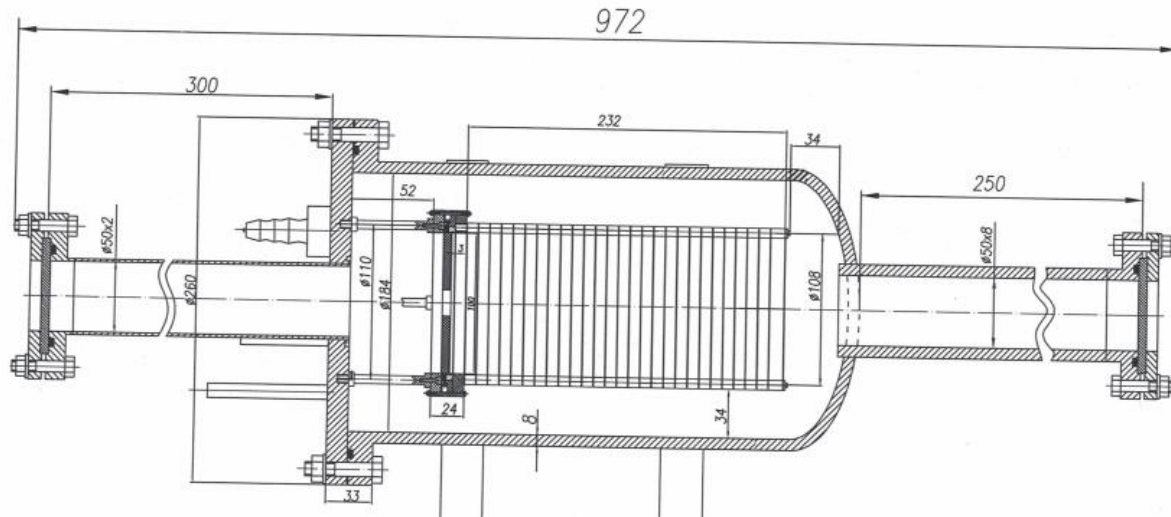
COMPTON



ACTAF2



ACTAM



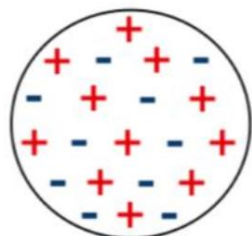
Данные по поляризуемости протона

	$\alpha, \cdot 10^{-4} fm^3$	$\beta, \cdot 10^{-4} fm^3$	Ref
1	9.0 ± 2.0	2.0 ± 2.0	V.I. Goldansky, Elastic γ -p scattering at 40 to 70 MeV and polarizability of the proton. Nuclear Physics, 18:473–491, 1960.
2	10.7 ± 1.1	-0.7 ± 1.6	P. Baranov, New experimental data on the proton electromagnetic polarizabilities. Physics Letters B, 52(1):122–124, 1974.
3	$10.9 \pm 2.2 \pm 1.3$	$3.3 \pm 2.2 \pm 1.3$	F. J. Federspiel, Proton compton effect: A measurement of the electric and magnetic polarizabilities of the proton. Phys. Rev. Lett., 67:1511–1514, Sep 1991.
4	$10.6 \pm 1.22 \pm 1.05$	$3.6 \pm 1.22 \pm 1.05$	A. Zieger, 180° compton scattering by the proton below the pion threshold. Physics Letters B, 278(1):34–38, 1992
5	$9.8 \pm 0.4 \pm 1.1$	$4.4 \pm 0.4 \pm 1.1$	E. L. Hallin, Compton scattering from the proton. Phys. Rev. C, 48:1497–1507, Oct 1993.
6	$12.5 \pm 0.6 \pm 0.7 \pm 0.5$	$1.7 \pm 0.6 \pm 0.7 \pm 0.5$	B. E. MacGibbon, Measurement of the electric and magnetic polarizabilities of the proton. Phys. Rev. C, 52:2097–2109, Oct 1995.
7	$11.9 \pm 0.5 \pm 1.3 \pm 0.3$	$1.2 \pm 0.7 \pm 0.3 \pm 0.4$	V. Leon, Low-energy compton scattering and the polarizabilities of the proton. The European Physical Journal A, 10:207–215, 04 2001.
8	$10.99 \pm 0.16 \pm 0.47 \pm 0.17 \pm 0.34$	$3.14 \pm 0.21 \pm 0.24 \pm 0.20 \pm 0.35$	P.P. Martel, Measurement of compton scattering at mami for the extraction of the electric and magnetic polarizabilities of the proton. Phys. Rev. Lett., 128:132503, Apr 2022
9	11.2 ± 0.4	2.5 ± 0.4	R. L. Workman and Others. Review of Particle Physics. PTEP, 2022:083C01, 2022.

1. O. Yevetska, S. Watzlawik, J. Ahrens, G.D. Alkhazov, V.P. Chizhov, E.M. Maev et al., Nuclear instruments and methods, A 618, 160-167 (2010) "New experimental method for investigation of the nucleon polarizabilities"
2. Vorobyov, A.A.; Korolev, G.A.; Schegelsky, V.A.; Solyakin, G.Ye.; Sokolov, G.L.; Zalite, Yu.K., Nuclear instruments and methods 119 (1974) 509-519 "A method for studies of small-angle hadron-proton elastic scattering in the coulomb interference region"(AN SSSR, Leningrad. Inst. Yadernoj Fiziki)

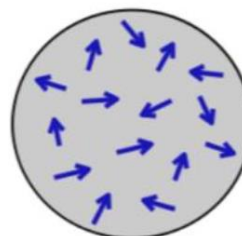
Поляризуемость нуклона

электрическая
поляризуемость

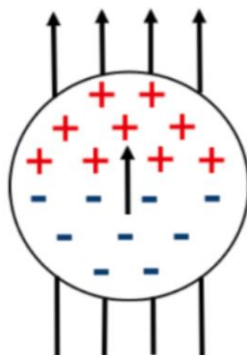


$$D = 0$$

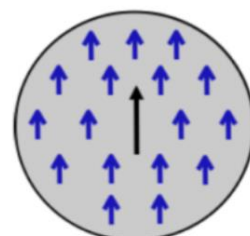
магнитная
поляризуемость



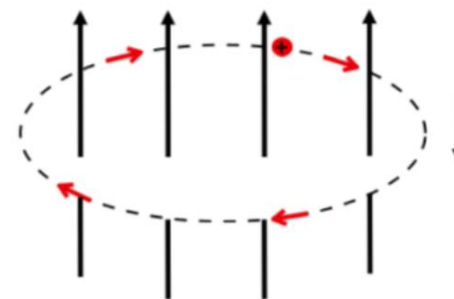
$$M = 0$$



$$D = \alpha E$$

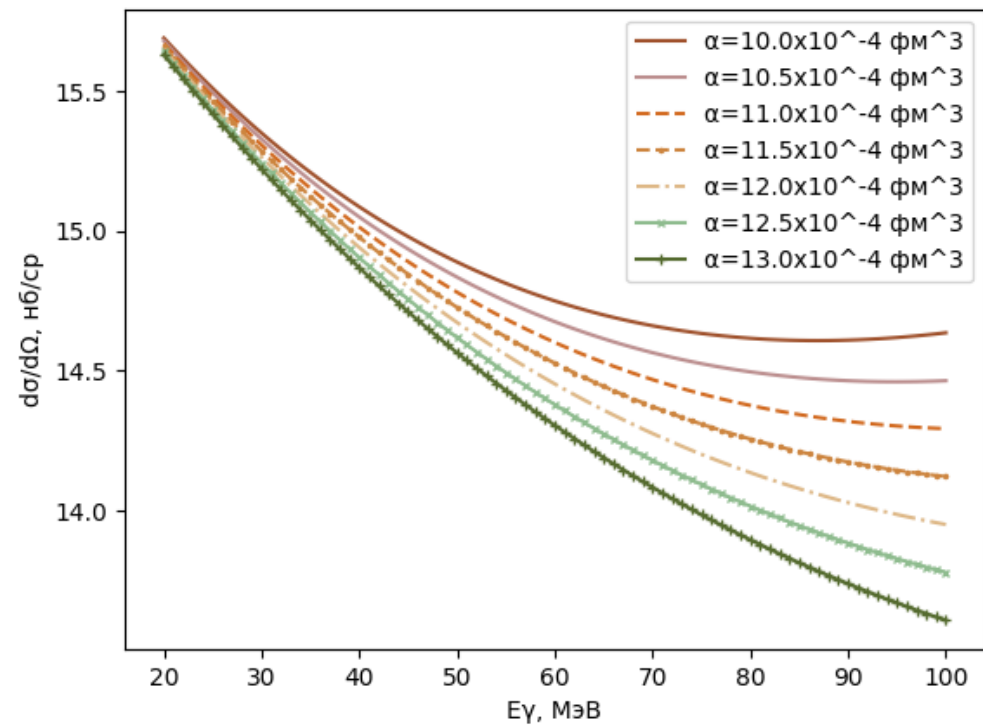
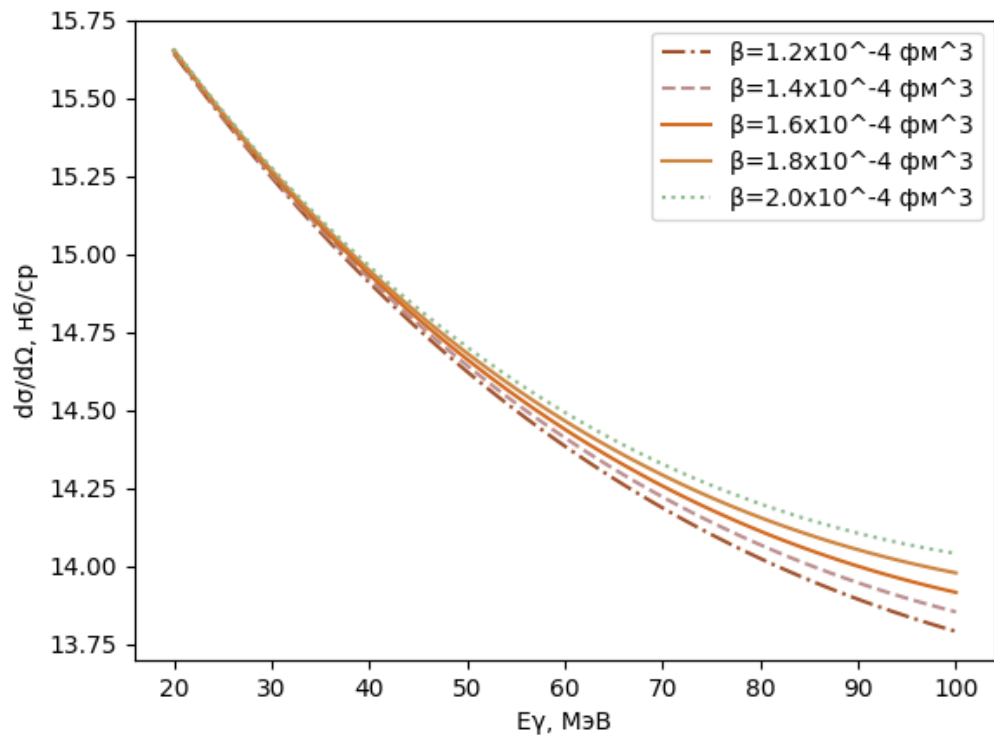


парамагнитная
 $M = \beta_{\text{para}} B$



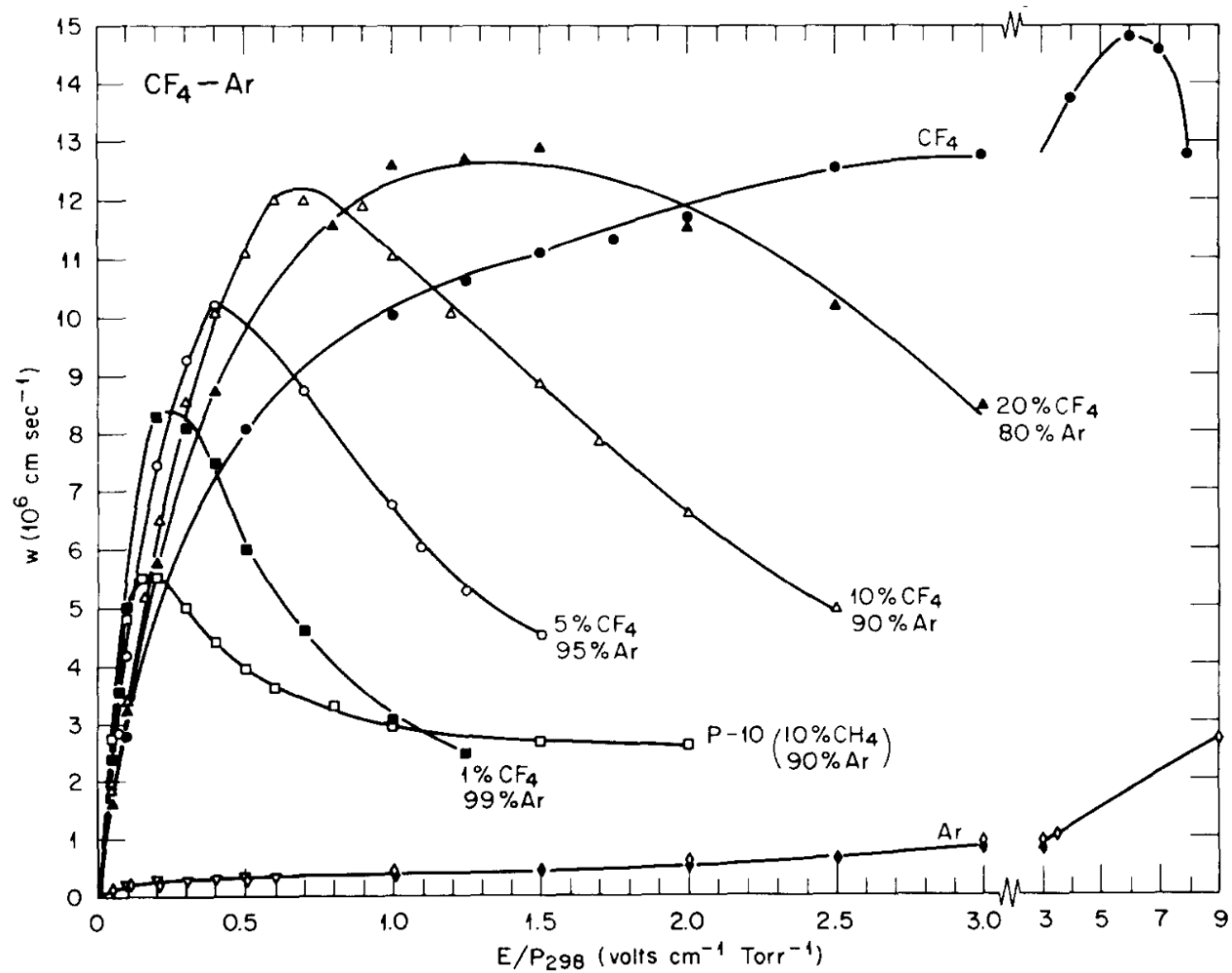
диамагнитная
 $M = \beta_{\text{dia}} B$

Зависимость диф. сечения от параметров α и β



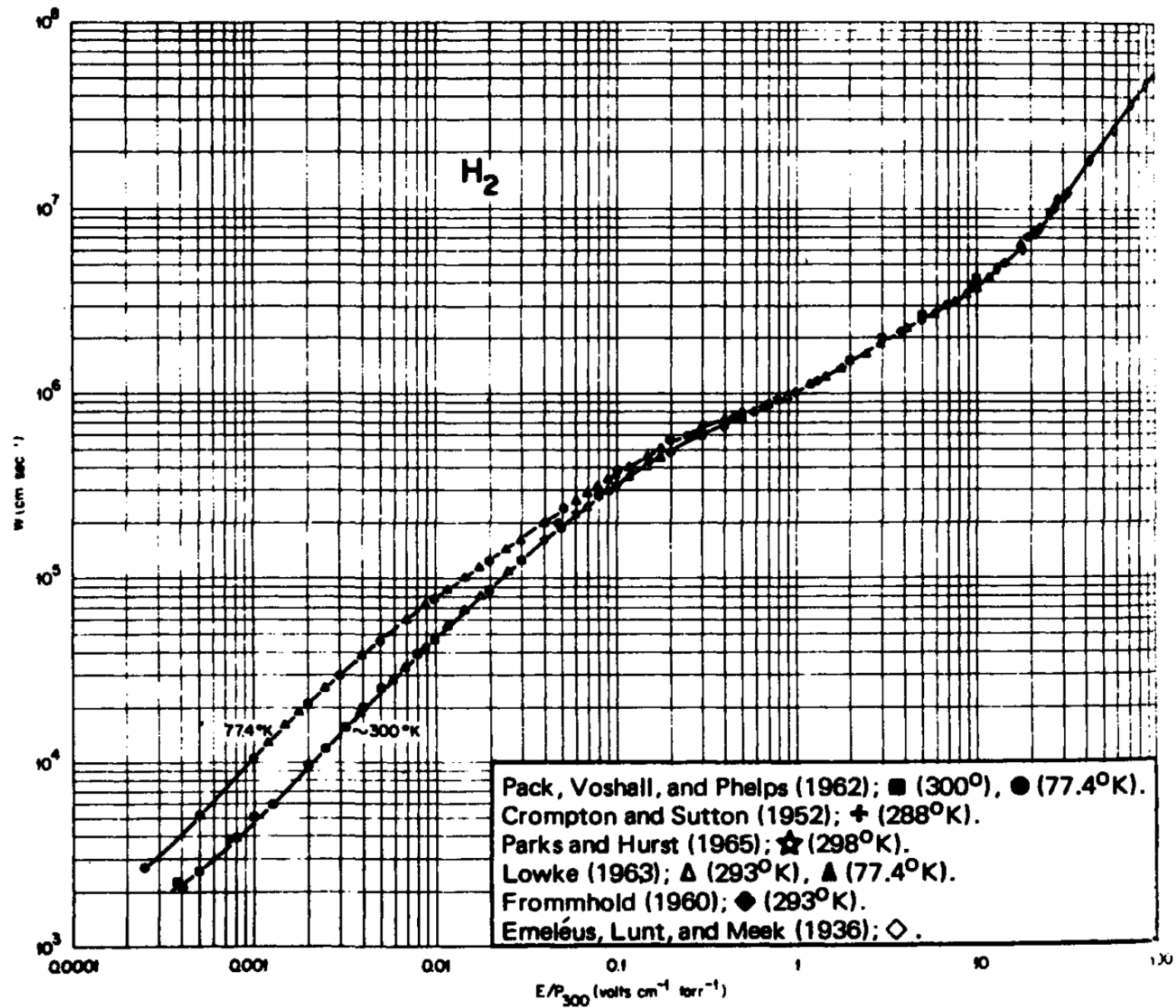
Ошибки

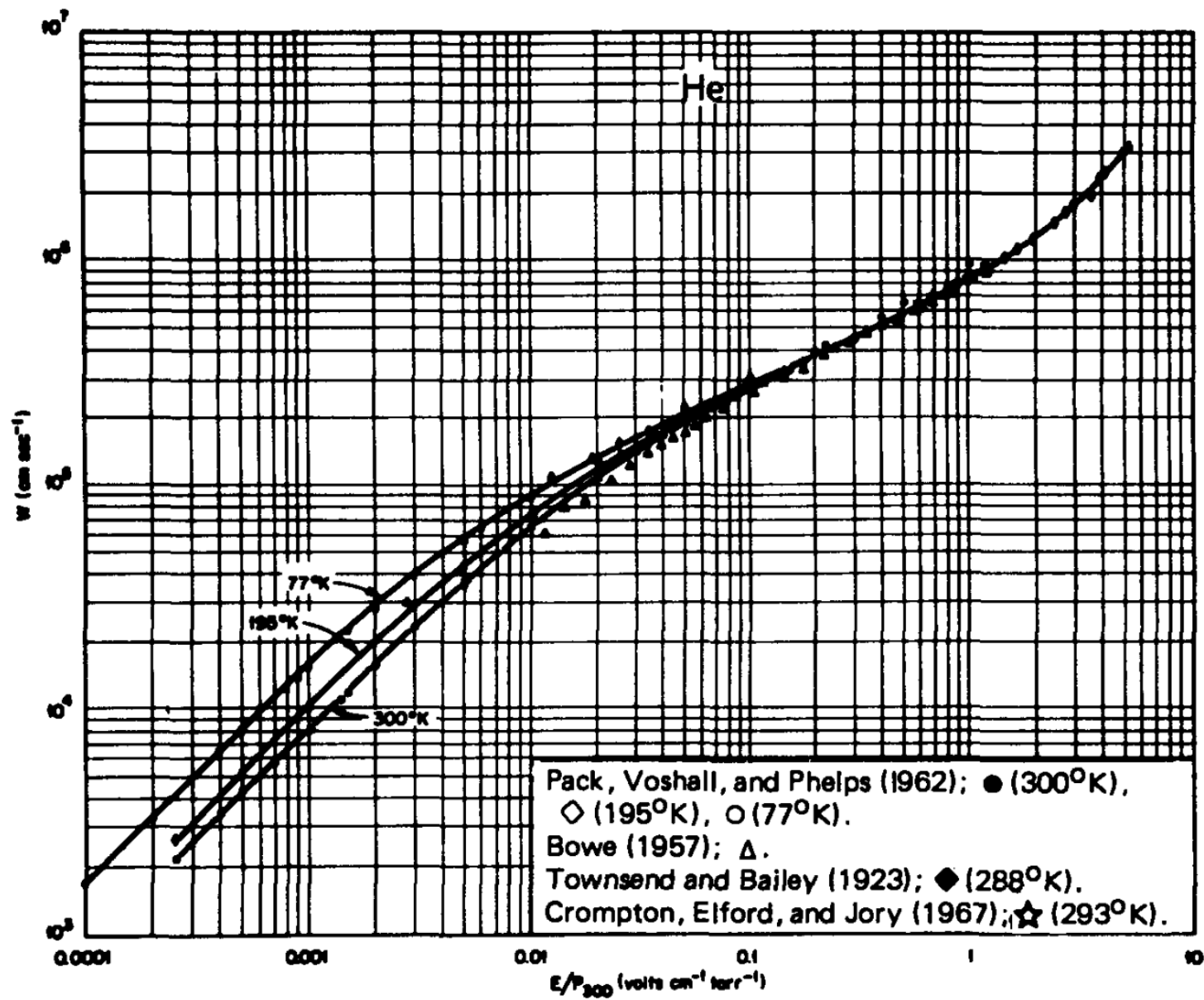
	$\Delta\alpha \cdot 10^{-4} \text{ фм}^3$	$\Delta\beta \cdot 10^{-4} \text{ фм}^3$
Влияние ошибки в определении потока фотонов 0.25%	0.07	0.064
Фон	0.05	0.11

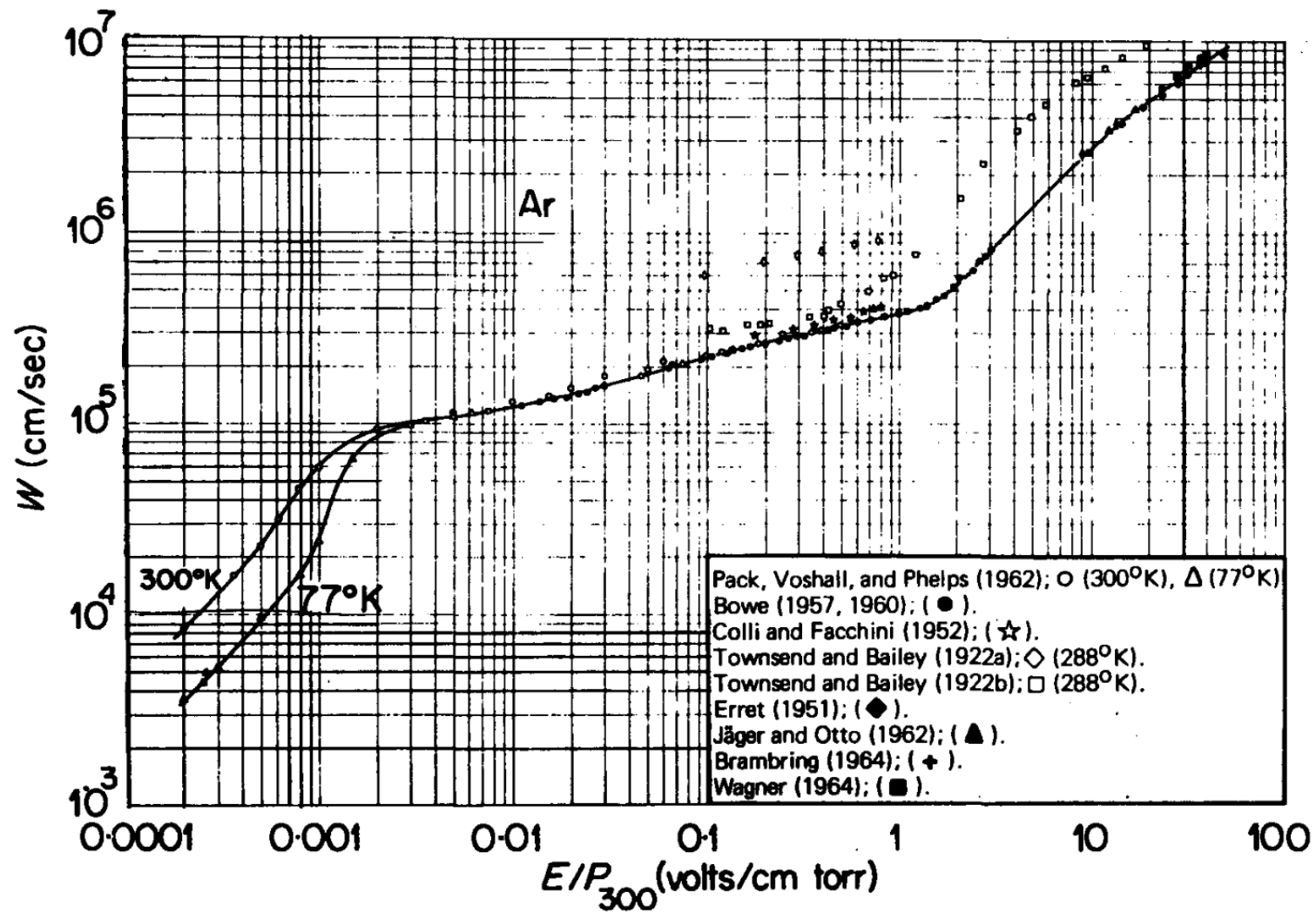


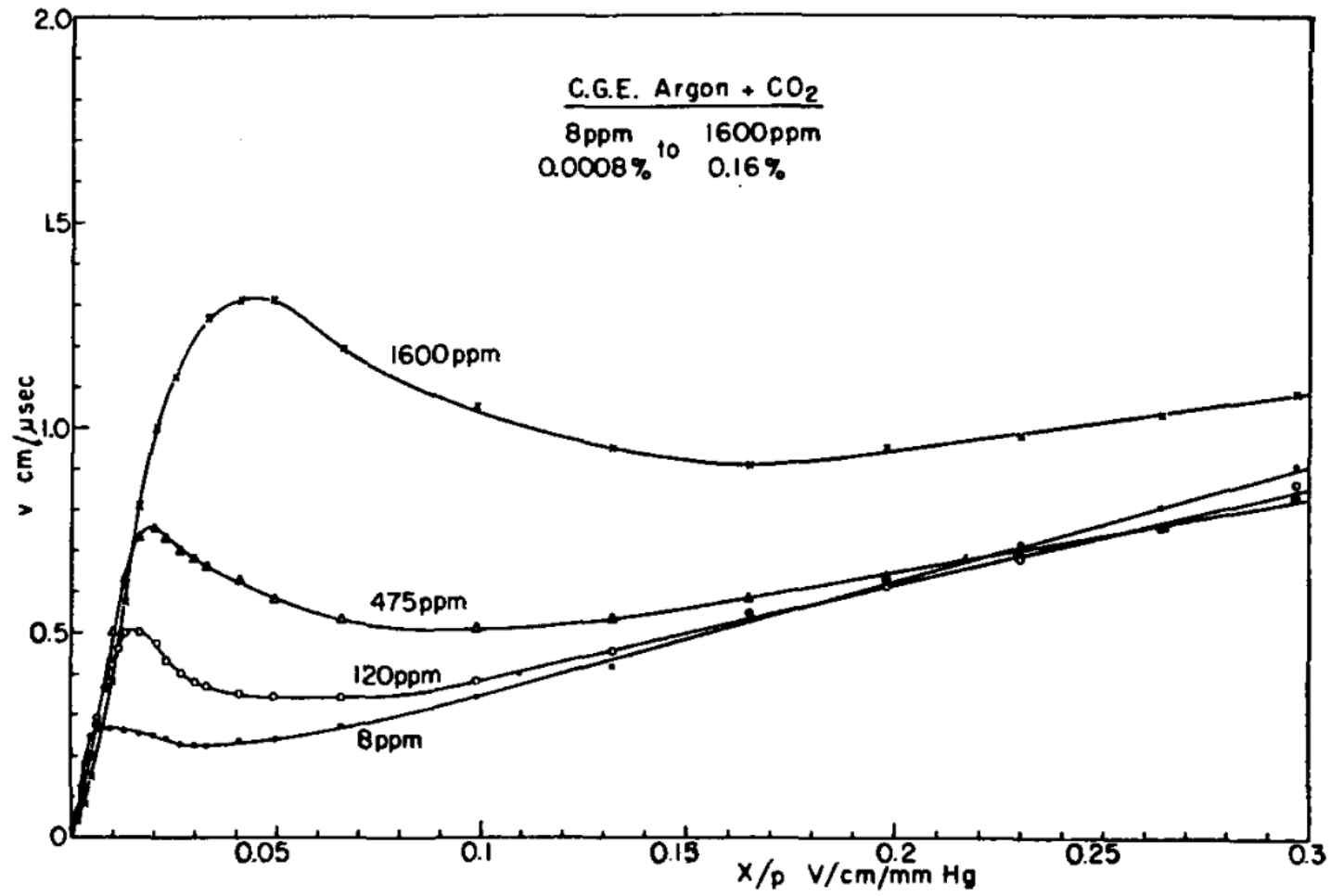
Скорость дрейфа в Ar в зависимости от отношения E/p

L.G. Christophorou, D.L. McCorkle, D.V. Maxey, J.G. Carter,
Fast gas mixtures for gas-filled particle detectors,
Nuclear Instruments and Methods,
Volume 163, Issue 1, 1979, Pages 141-149, ISSN 0029-554X,
[https://doi.org/10.1016/0029-554X\(79\)90042-9](https://doi.org/10.1016/0029-554X(79)90042-9).



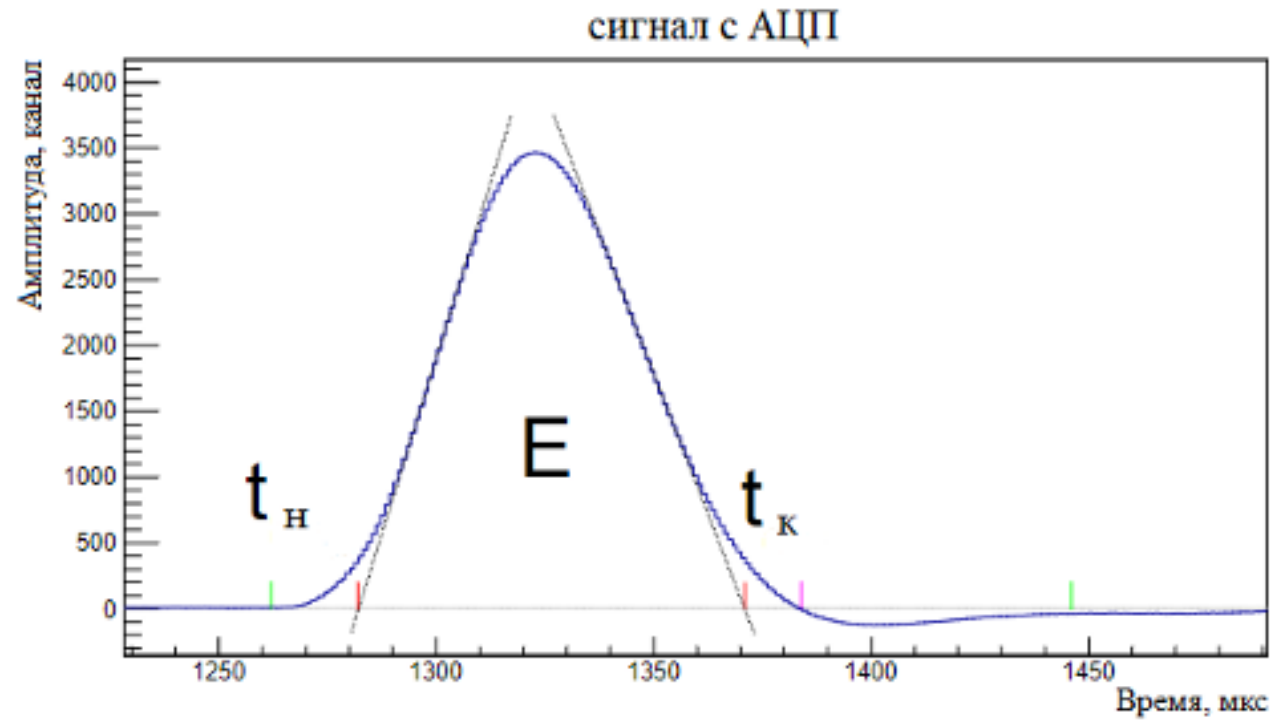




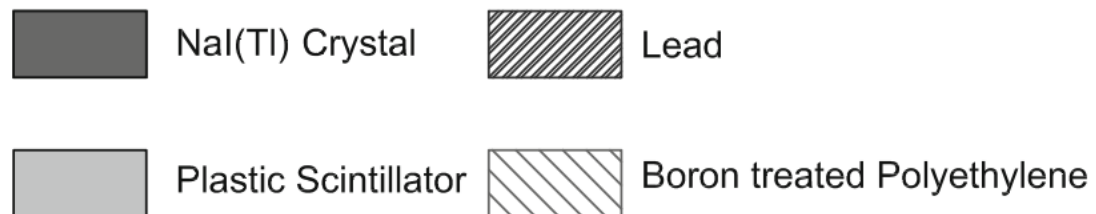
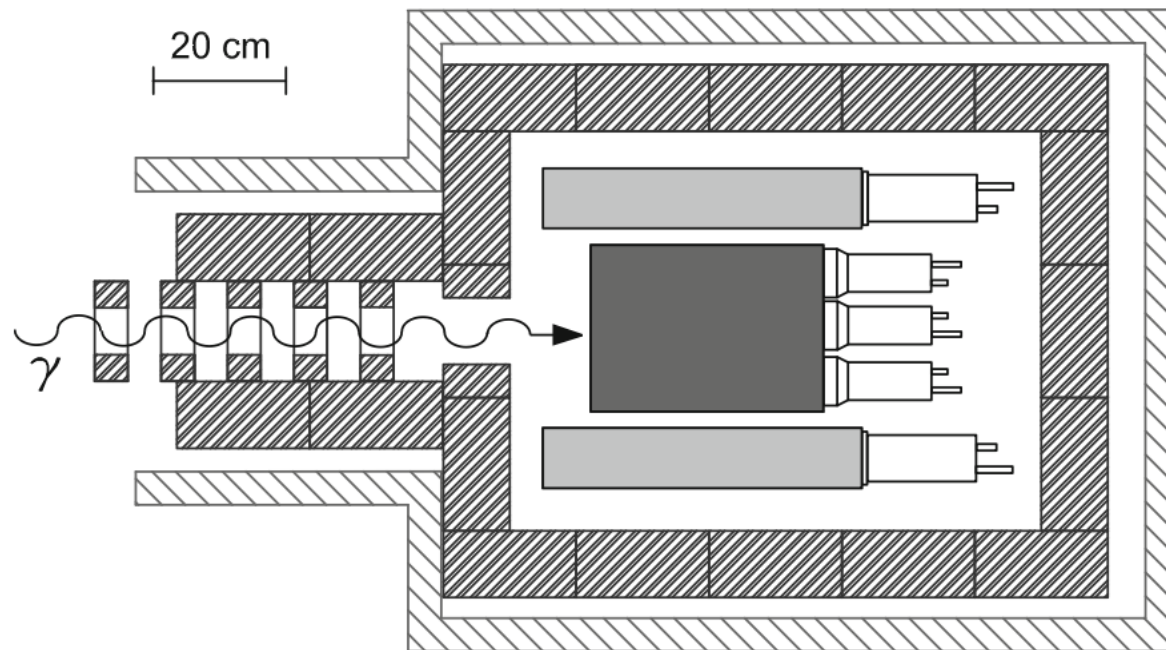


Химический анализ рабочих газов

Газ	Дата пробы	Результат
<i>Ar</i> , 0.34 атм	13.02.2023	0.6% <i>O</i> ₂ , 2.3% <i>N</i> ₂ , 0.45% <i>He</i>
<i>Ar</i> , 0.34 атм	10.04.2023	0.6% <i>O</i> ₂ , 2.3% <i>N</i> ₂
<i>Ar</i> , 1.22 атм	14.04.2023	10 ppm <i>O</i> ₂ , 40 ppm <i>N</i> ₂
<i>Ar</i> , 0.34 атм	20.04.2023	0.4% <i>O</i> ₂ , 1.7% <i>N</i> ₂
<i>He</i> , 1.71 атм	27.04.2023	600 ppm <i>Ar</i> , 30 ppm <i>O</i> ₂ , 120 ppm <i>N</i> ₂
<i>He</i> , 1.71 атм	02.05.2023	600 ppm <i>Ar</i> , 30 ppm <i>O</i> ₂ , 120 ppm <i>N</i> ₂
<i>He</i> + 5% <i>N</i> ₂ , 1.71 атм	17.05.2023	4.7% <i>N</i> ₂ , 900 ppm <i>Ar</i> , 30 ppm <i>O</i> ₂



Сигнал, записанный с генератора. $t_{\text{н}}$ – время начала сигнала, $t_{\text{к}}$ – время конца сигнала, E - площадь сигнала, пропорциональная энергии.



- 1) differential cross section, $d\sigma(E_\gamma, \theta_\gamma)/d\Omega \sim 12 \text{ nb/sr}$ (rough average for E_γ from 20 to 100 MeV and $\theta_\gamma = 90^\circ$ and 130°).
 - 2) photon beam intensity, $N_\gamma(E_\gamma) = 2 \cdot 10^9 \text{ MeV}^{-1} \text{ s}^{-1}$, at $E_\gamma = 60 \text{ MeV}$ and $N_\gamma = 2 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1}$ in the photon energy range of 20–100 MeV (taken to be a S-DALINAC test experiment value assuming an electron energy of 110 MeV at a beam current of 50 μA).
 - 3) target thickness $t = 4 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-2}$, at $p = 75 \text{ bar}$ of the gas (H_2) pressure and for $x = 10 \text{ cm}$ (linear thickness of the gas).
 - 4) solid angle, $\Delta\Omega = 25 \text{ msr}$, for NaI entrance collimator diameter of 12 cm and NaI distance from the front face to the IC target of 70 cm.
 - 5) $\Delta E_\gamma = 4 \text{ MeV}$ is the energy bin and $\epsilon_{\text{det}} \sim 1$ for NaI detector.
- Using these values in the above expression for the count rate, we obtain a rate of $\sim 400 \text{ counts/hour}$ at $E_\gamma = 60 \text{ MeV}$ and $\Delta E_\gamma = 4 \text{ MeV}$.

