

**STATUS OF THE JOINT PNPI-TUD  
EXPERIMENT IN DARMSTADT  
ON THE NUCLEON POLARIZABILITIES**



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
ИМ. Б.П.КОНСТАНТИНОВА

2104

NP-12-1996

**D.V. Balin, M.J. Borkowski, V.P. Chizhov,  
G.A. Kolomensky, E.M. Maev, D.M.Seliverstov,  
G.G. Semenchuk, Yu.V. Smirenin, A.A.Vasiliev,  
A.A. Vorobyov, N.Yu. Zaitsev**

**Compton Scattering on Protons:  
Project of Experimental  
Determination of Electric  
and Magnetic Polarizabilities  
of the Proton**

**ГАТЧИНА 1996**

## **В обосновании и подготовке эксперимента принимали участие:**

И.Б. Смирнов,  
Г.М. Шкляревский,  
А.Г. Крившич,  
В.А. Трофимов,  
И.Н. Тимонин,  
Г.А. Ганжа,  
А.М. Переверзев,  
В.С. Дубограй.

## **На первом этапе в экспериментах принимали участие:**

В.П. Чижов,  
Ю.В. Смиренин,  
Д.В. Балин,  
В.И. Яцура,  
Л.О. Сергеев.

## **В последнее время в работе принимали участие:**

Г.Д. Алхазов,  
Е.М. Маев,  
Е.М. Орищин,  
Г.Е. Петров,  
В.В. Саранцев,  
О.Е. Федоров.

## Участники работы со стороны TUD

1. A. Richter,
2. G. Schrieder,
3. J.-M. Porte,
4. S. Watzlawik,
5. O. Yevetska.

- 1996 г. – предложение о проведении эксперимента в ТУД
- 1999 г. – Ti IC в ИКР TUD
- 2000 г. – проблемы с камерой
- 2001 г. – Fe IC в ИКР TUD
- 2004 г. – 1 день набора данных на пучке электронов 1  $\mu$ A
- 2006 г. – диссертация Steffen Watzlawik
- 2004 г. – начато изготовление камеры на 2 угла рассеяния
- 2005 г. – новая камера в ИКР TUD (с задержкой в 0.5 года)  
проблемы со сваркой и электродами
- 2006 г. – набор данных в течение 1 недели на пучке 60 МэВ, 3  $\mu$ A  
(набрано около 1000 событий)
- 2007 г. – набор данных в течение 3 недель на пучке 70 МэВ, 1  $\mu$ A  
(ускоритель работал неустойчиво, набрано около 250 событий)
- 2008 г. – калибровка NaI спектрометра
- 2009 г. – диссертация О. Евецки

The electric and magnetic nucleon polarizabilities of the nucleon,  $\alpha$  and  $\beta$ , characterize the response of its internal structure to applied electric and magnetic fields.

$$\mathbf{d} = \alpha \mathbf{E} \quad \boldsymbol{\mu} = \beta \mathbf{B}$$

$$\bar{\alpha} = 2 \sum_{n \neq N} \frac{|\langle n | D_z | N \rangle|^2}{E_n - E_N} + \Delta\alpha \equiv \alpha_0 + \Delta\alpha,$$

$$\bar{\beta} = 2 \sum_{n \neq N} \frac{|\langle n | M_z | N \rangle|^2}{E_n - E_N} + \Delta\beta \equiv \beta_0 + \Delta\beta.$$

# ТЕОРИЯ

**Нерелятивистская кварковая модель:**

$$\alpha_p \approx 6 \cdot 10^{-4} \text{ fm}^3, \beta_p \approx 4 \cdot 10^{-4} \text{ fm}^3$$

**Киральные кварковые модели:**

$$\alpha_p \approx 8 \cdot 10^{-4} \text{ fm}^3, \beta_p \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ fm}^3$$

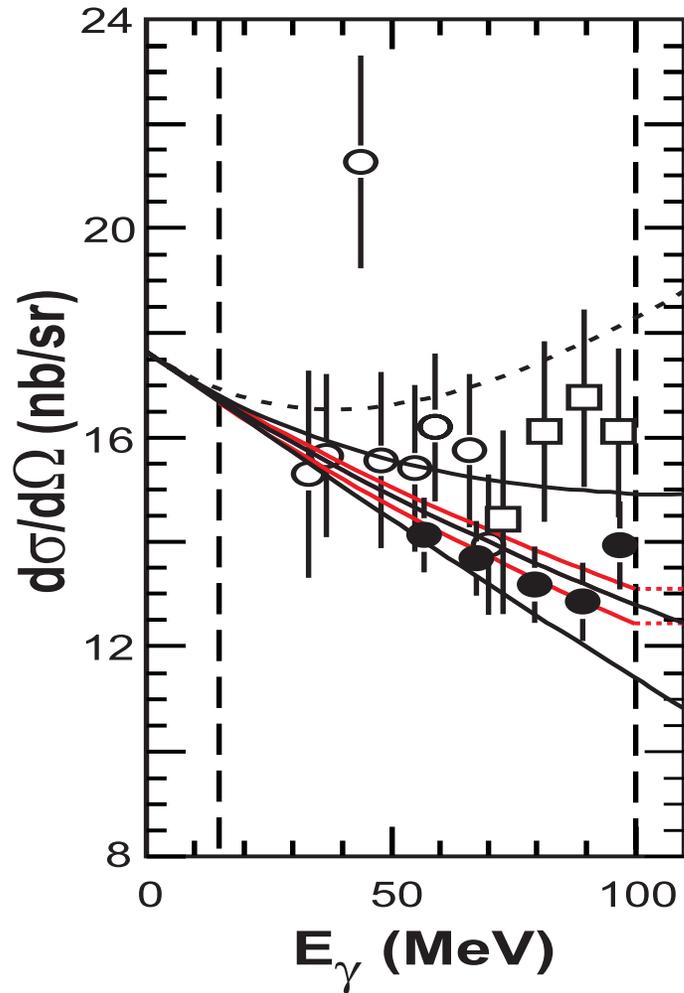
**Киральные солитонные модели:**

$$\alpha_p \approx 13 \cdot 10^{-4} \text{ fm}^3, \beta_p \approx -1 \cdot 10^{-4} \text{ fm}^3$$

## Cross section for Compton scattering

$$\left[ \frac{d\sigma(E_\gamma, \theta)}{d\Omega} \right]_{\text{LET}} = \left[ \frac{d\sigma(E_\gamma, \theta)}{d\Omega} \right]_{\text{Powell}} - \rho + \mathcal{O}(E_\gamma^4)$$

$$\rho = \frac{e^2}{4\pi m_p} \left( \frac{E_{\gamma'}}{E_\gamma} \right)^2 \frac{E_\gamma E_{\gamma'}}{(\hbar c)^2} \times$$
$$\times \left[ \frac{\bar{\alpha} + \bar{\beta}}{2} (1 + \cos \theta)^2 + \frac{\bar{\alpha} - \bar{\beta}}{2} (1 - \cos \theta)^2 \right]$$



**Born cross section**

$$\bar{\alpha} = 9 \cdot 10^{-4} \text{ fm}^3$$

$$\Delta\bar{\alpha} = 0.3 \cdot 10^{-4} \text{ fm}^3$$

$$\bar{\alpha} = 17 \cdot 10^{-4} \text{ fm}^3$$

- Urbana, 1991
- SAL, 1995
- TAPS 2001

Baldin sum rule:

$$\alpha_p + \beta_p = 13.8 \pm 0.4 \quad [10^{-4} \text{ fm}^3]$$

$$\alpha_n + \beta_n = 15.2 \pm 0.5$$

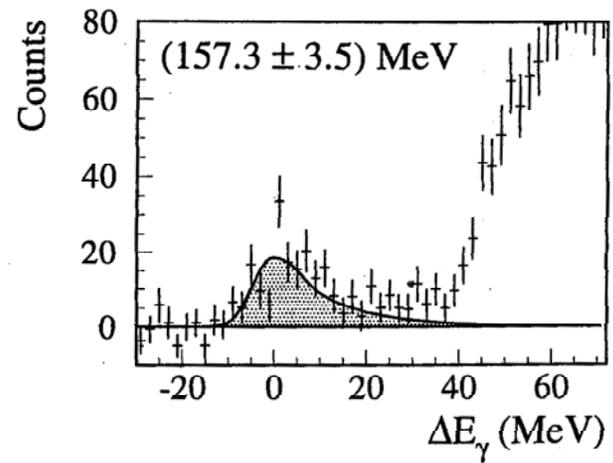
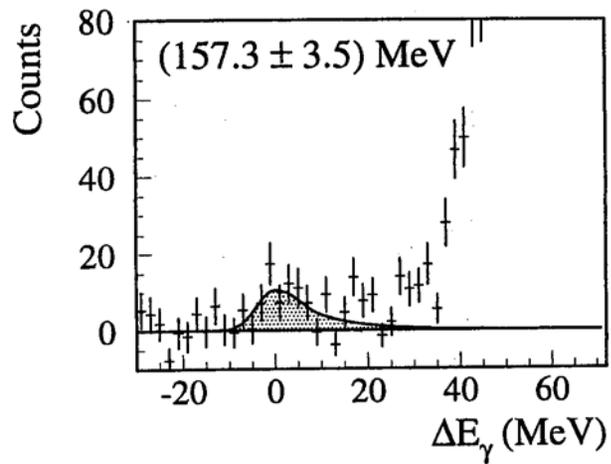
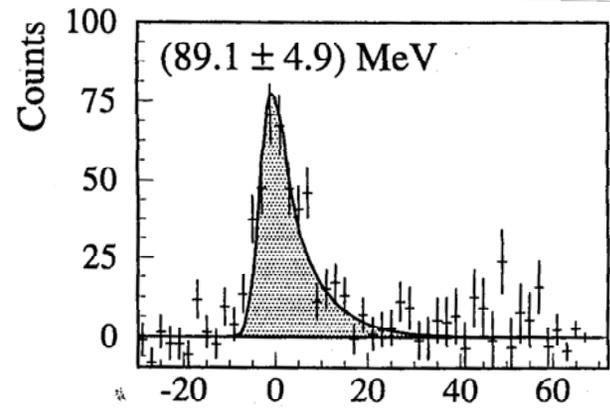
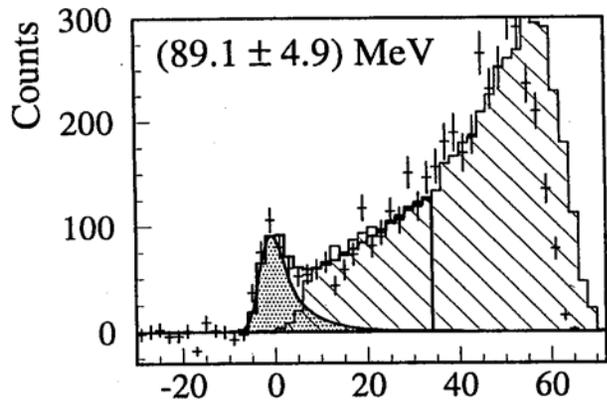
$$\alpha_p = 12.0 \pm 0.6 \quad \beta_p = 1.9 \pm 0.5$$

Scattering of neutrons on lead:  $\alpha_n = 13 \pm 6$  ;  $\alpha_n = 0.6 \pm 5$

Quasi-free Compton scattering from the deuteron:

$$\alpha_n = 7.6 - 14 \quad \beta_n = 1.2 - 7.6$$

Mainz:  $\alpha_n - \beta_n = 9.8 \pm 4.5$



V. Olmos de Leon et al., Eur. Phys. J. A 10, 207 (2001).

**Традиционный подход** к измерению сечений комптоновского рассеяния: рассеяние меченых фотонов.

### **Предложение В.П. Чижова:**

рассеивать фотоны тормозного спектра;  
рассеянные фотоны регистрировать на совпадение с протонами отдачи;  
энергию рассеиваемых фотонов определять по энергии рассеянных фотонов и энергии протонов отдачи.

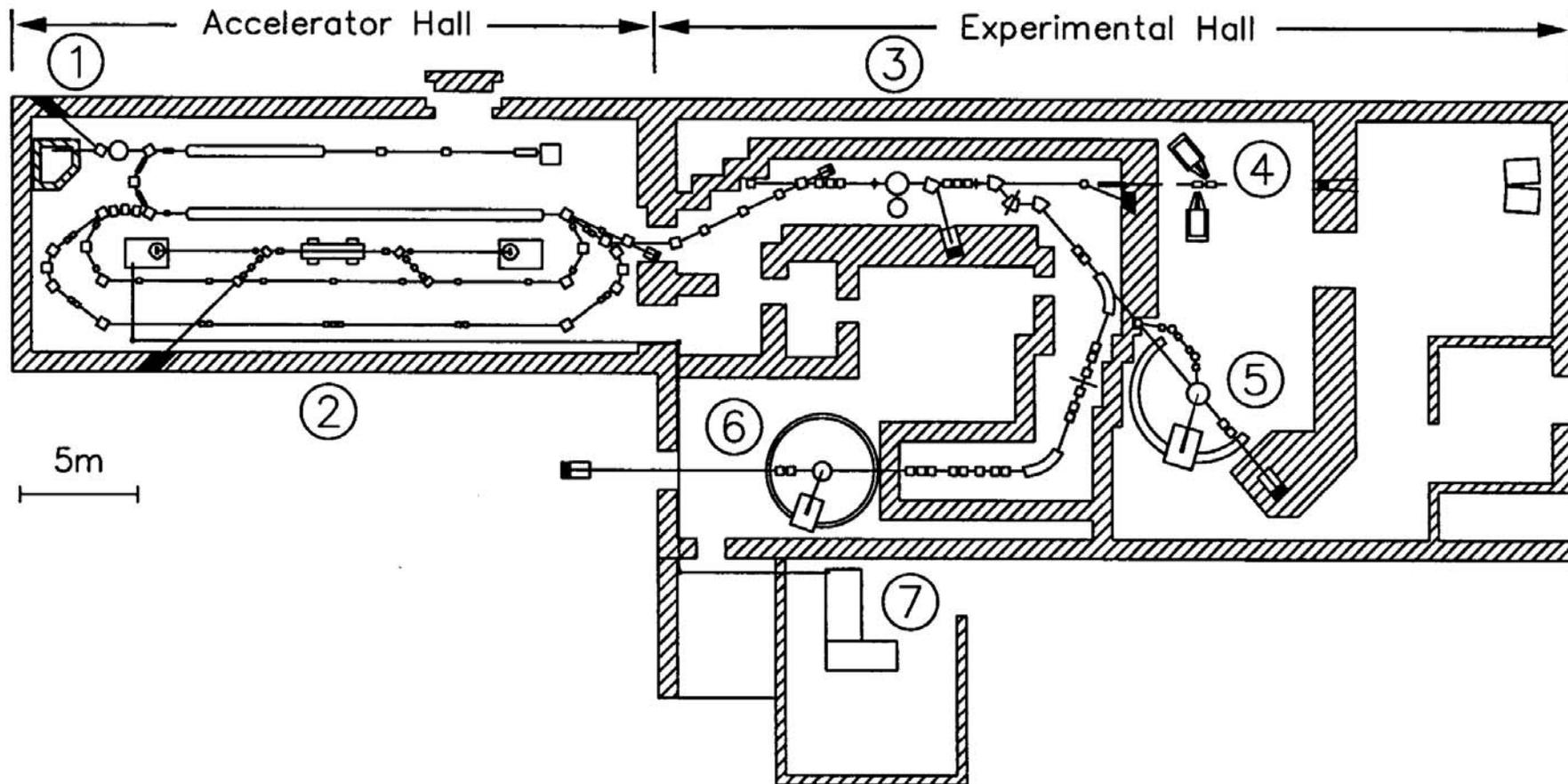
### **Преимущества метода Чижова:**

1. Большая интенсивность первичного пучка рассеиваемых фотонов.
2. Относительно малый фон благодаря одновременной регистрации фотонов и протонов отдачи.
3. Измерения могут быть выполнены при относительно малой энергии фотонов – малая модельная зависимость результата.

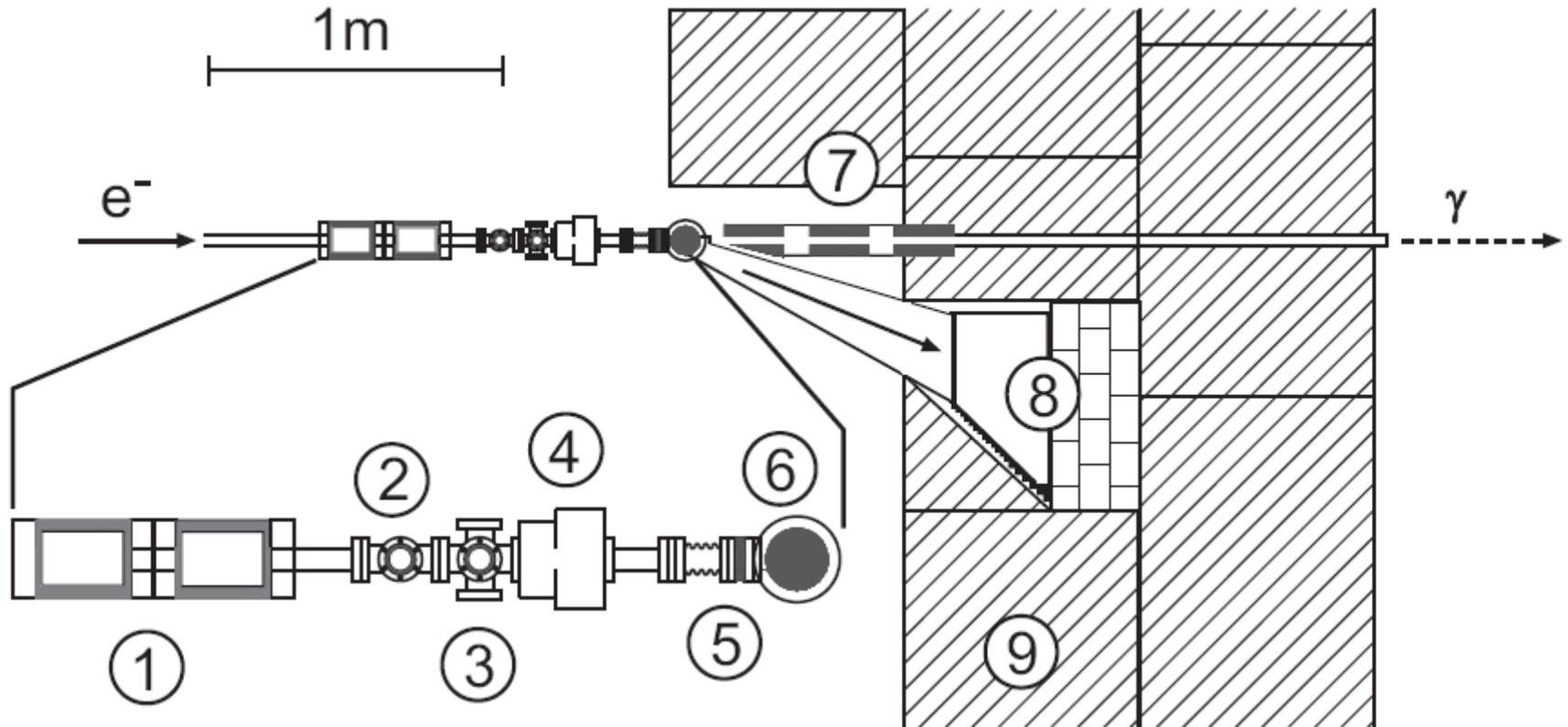
### **Недостатки метода Чижова:**

1. Измерения относительные, а не абсолютные.
2. Необходимо достаточно точно знать энергетический спектр падающего пучка фотонов.
3. Относительно малое количество атомов водорода в мишени.
4. Относительно небольшой телесный угол  $\gamma$ -детекторов.

## Ускоритель и экспериментальный зал ИКР TUD

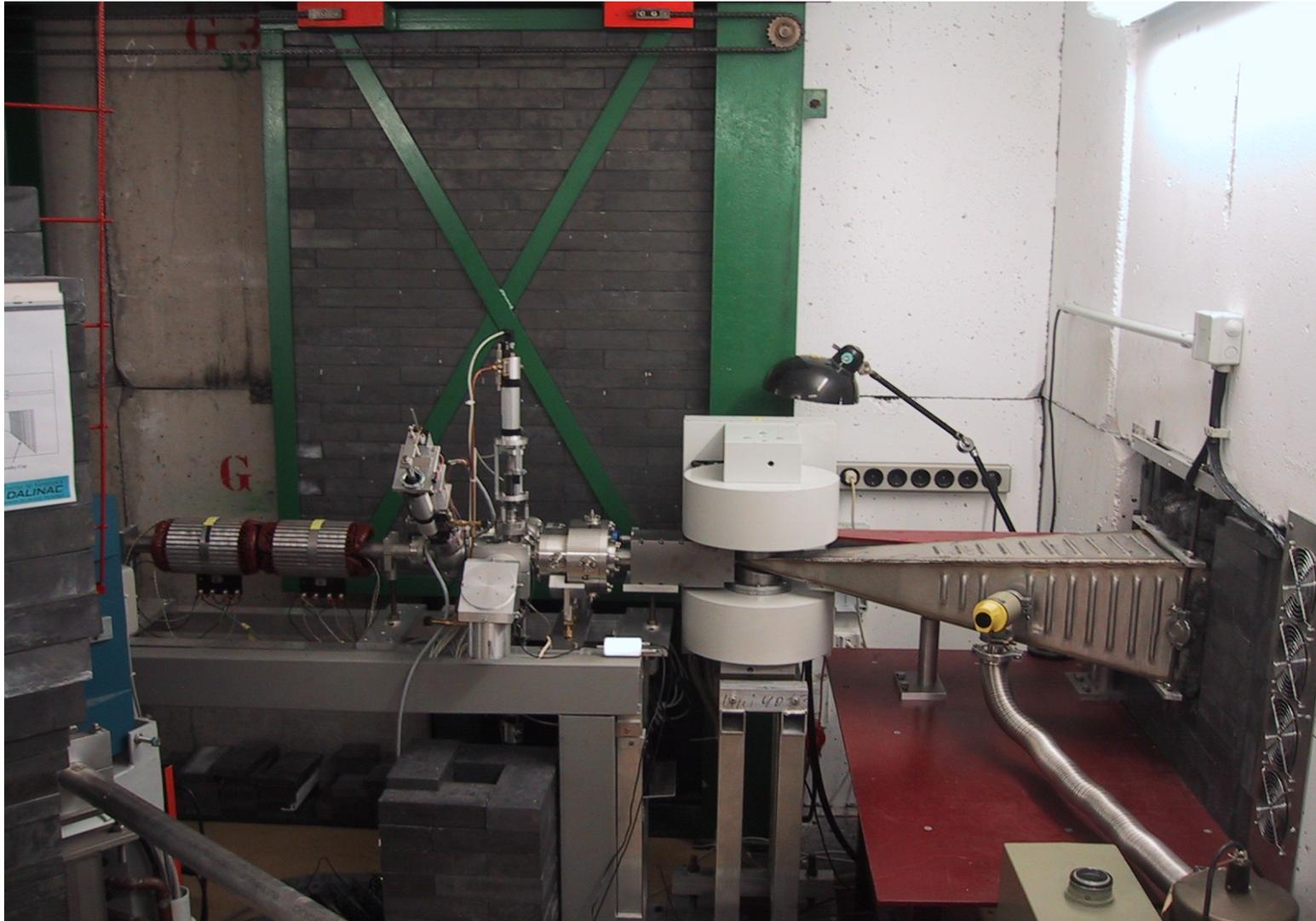


# Schematic view of the bremsstrahlung facility

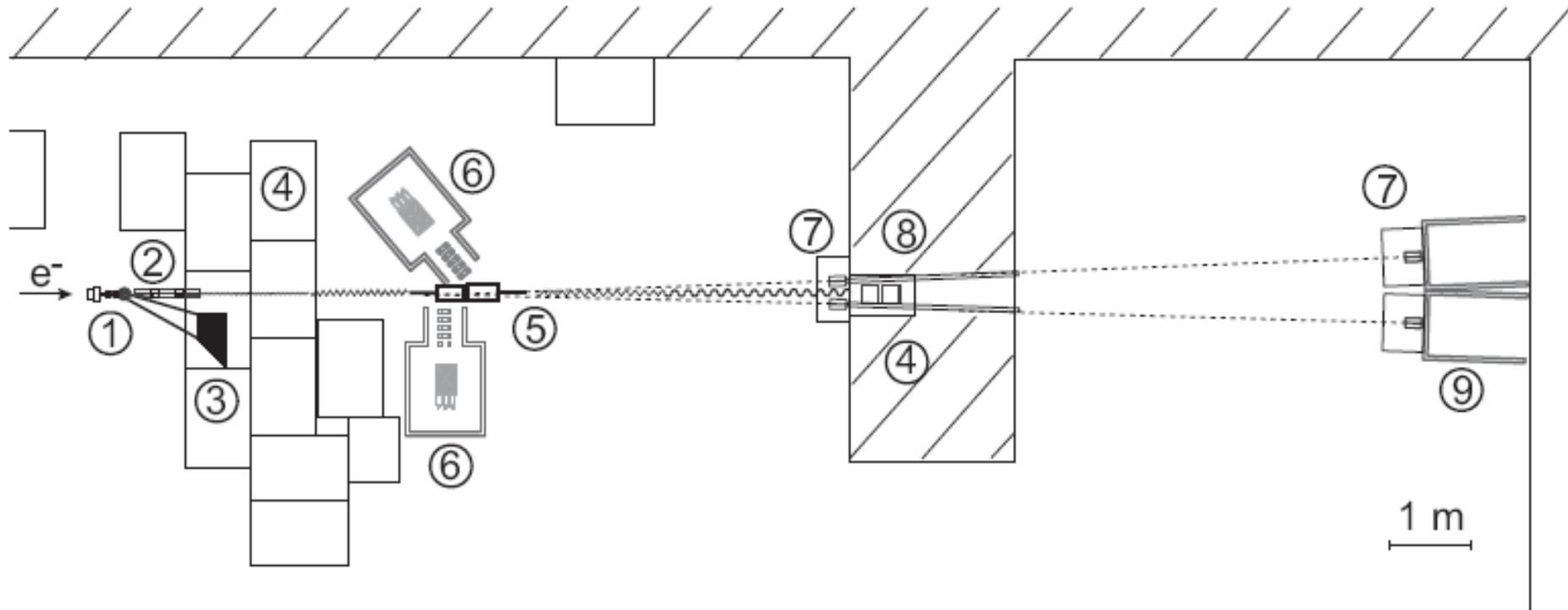


1 – direction correcting magnets, 2 – wire scanner, 3 – targets for beam position control, 4 – beam intensity and position rf monitor, 5 – bremstrahlung converter target, 6 – cleaning magnet, 7 –  $\gamma$ - beam collimator, 8 – electron beam dump, 9 – concrete shielding

# Bremsstrahlung facility

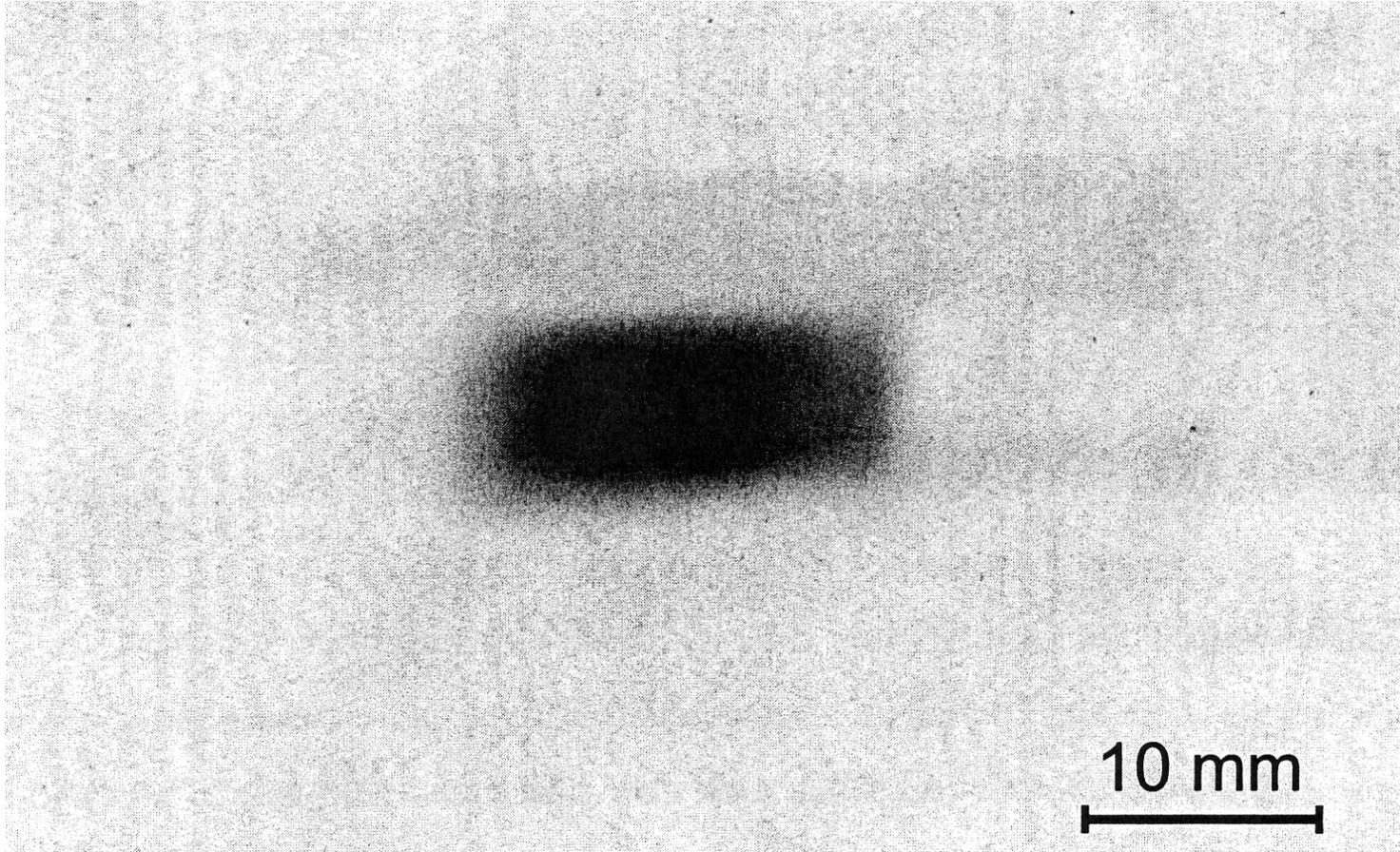


## Schematic view of the experimental setup

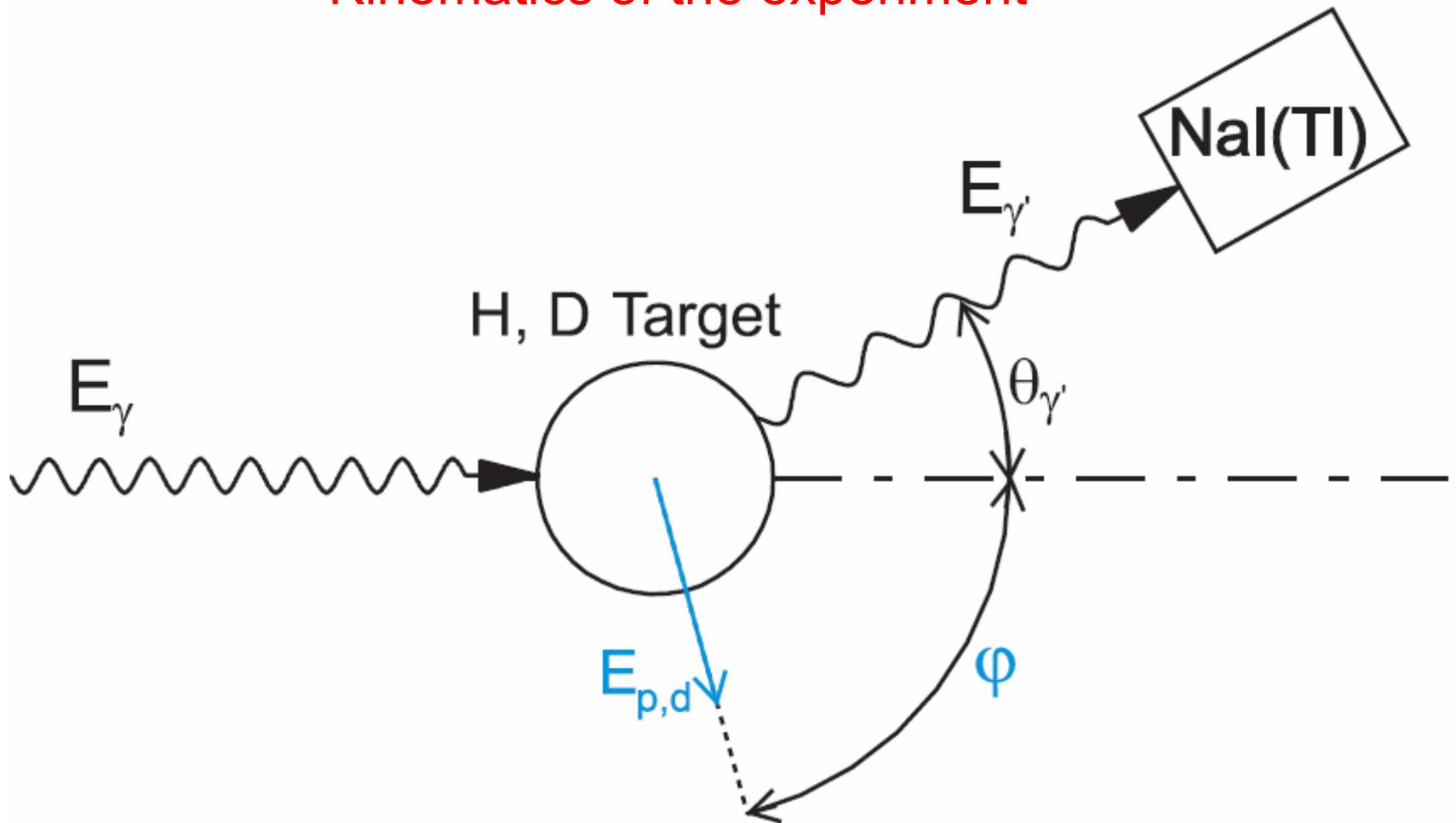


1 – bremsstrahlung converter, 2 – collimation system, 3 – electron beam dump, 4 – concrete shielding, 5 – hydrogen-filled ionization chambers, 6 –  $\gamma$  spectrometers, 7 – collimation system, 8 – position sensitive ionization chamber, Gaussian quantometer,  $\gamma$  beam dump, 9 –  $\gamma$  spectrometers

# $\gamma$ beam profile

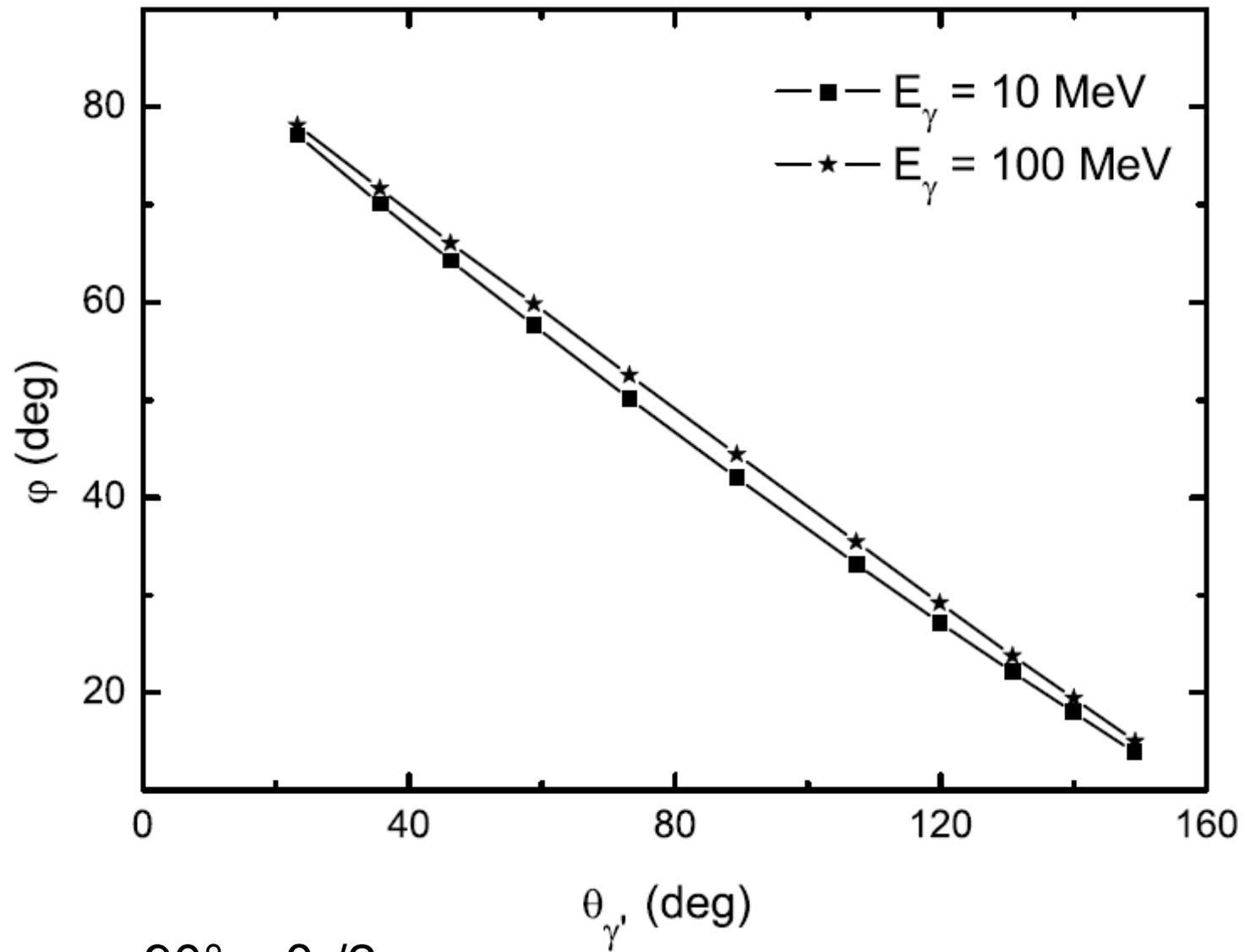


## Kinematics of the experiment



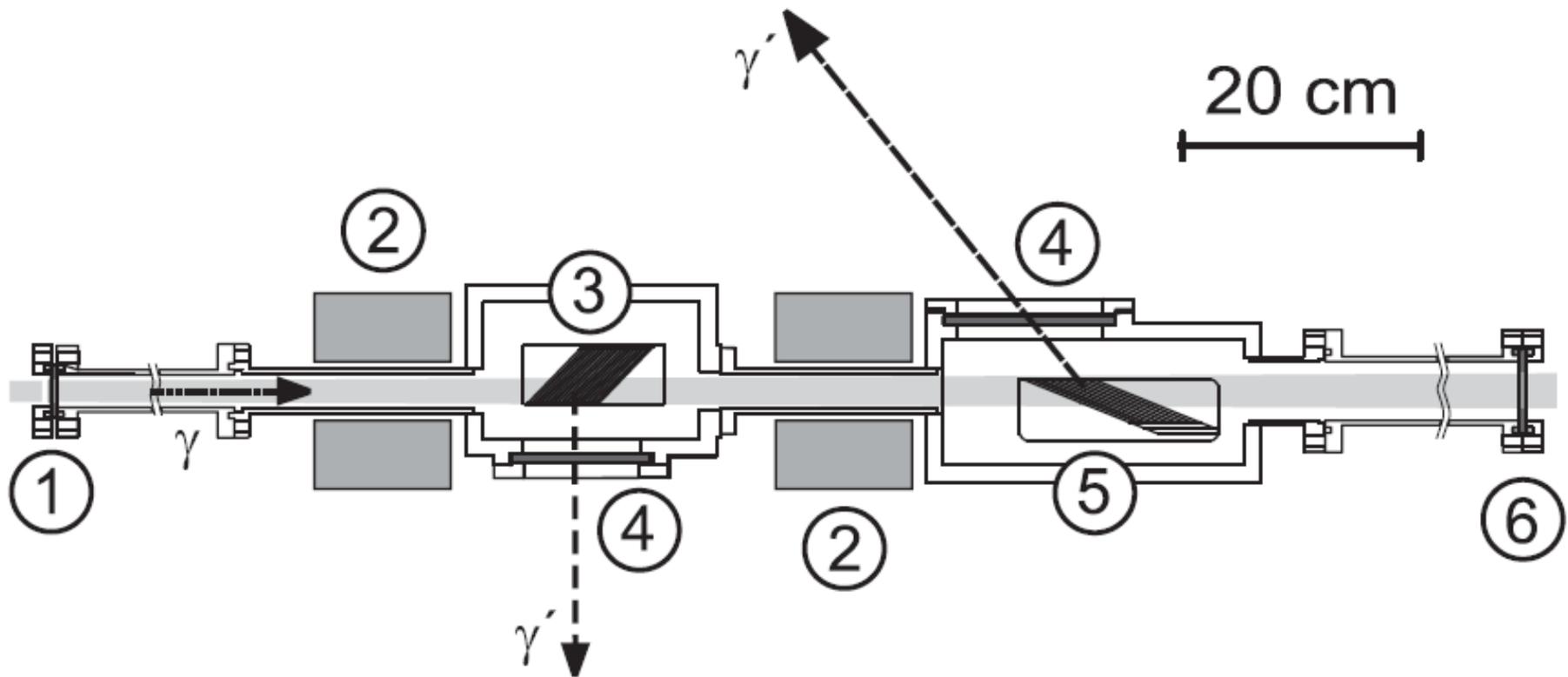
$$\phi_p \approx 90^\circ - \theta_{\gamma'}/2$$

$E_{p,d}$  is measured with the help of the ionization chambers



$$\phi_p \approx 90^\circ - \theta_\gamma/2$$

## Schematic top-view of the hydrogen-filled high-pressure ionization chambers

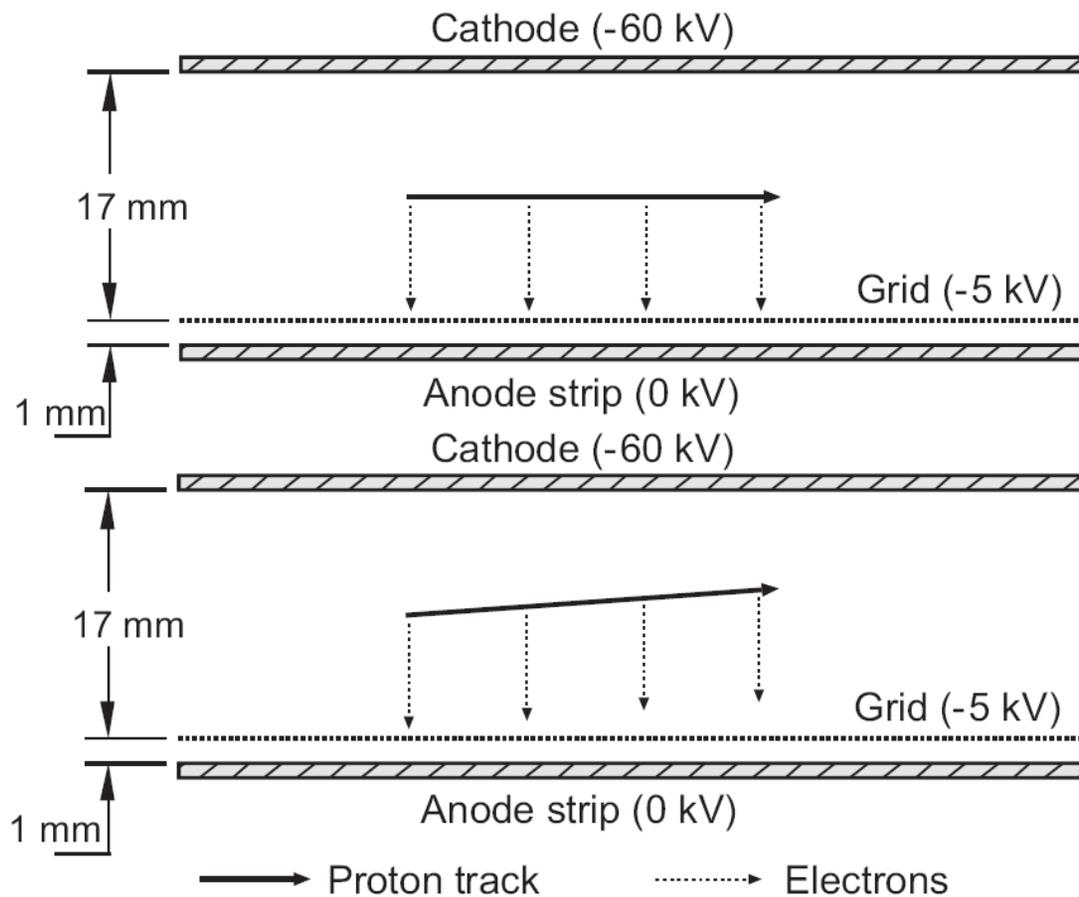


1, 6 – berillium windows, 2 – cleaning magnets, 3 – ionization chamber to measure  $\gamma$ -scattering on  $90^\circ$ , 4 – berillium windows, 5 – ionization chamber to measure  $\gamma$ -scattering on  $130^\circ$

## High-pressure (90 bar) hydrogen-filled ionization chambers at TUD

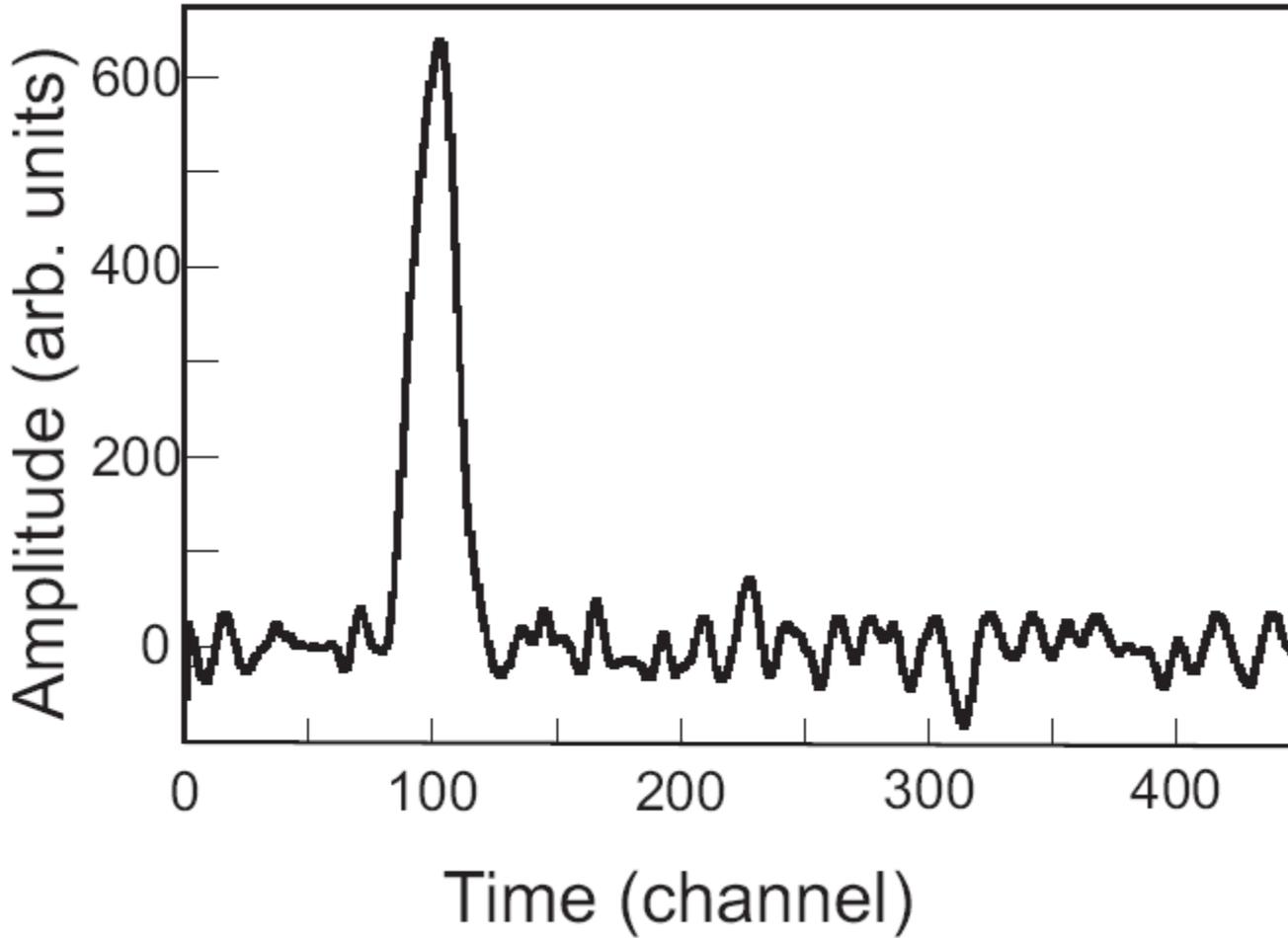


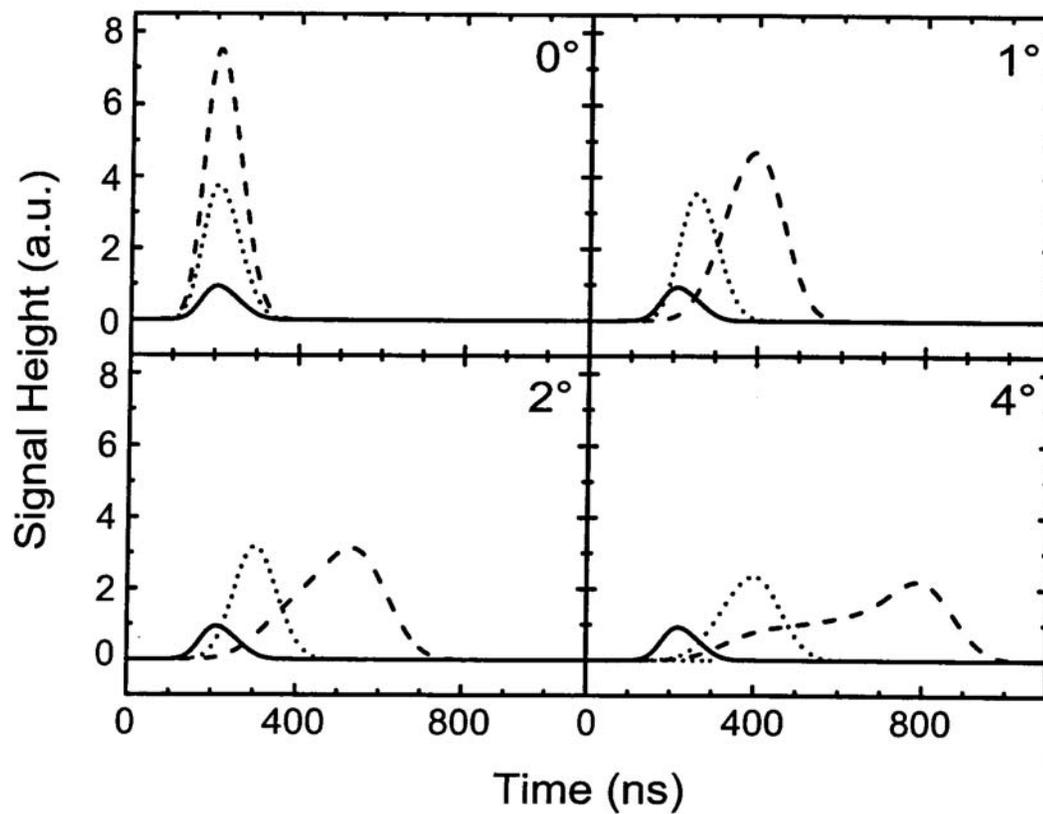
## Cathode-grid-anode geometry of the chambers (side view)



Maximum drift time is  $\sim 3.5 \mu\text{s}$

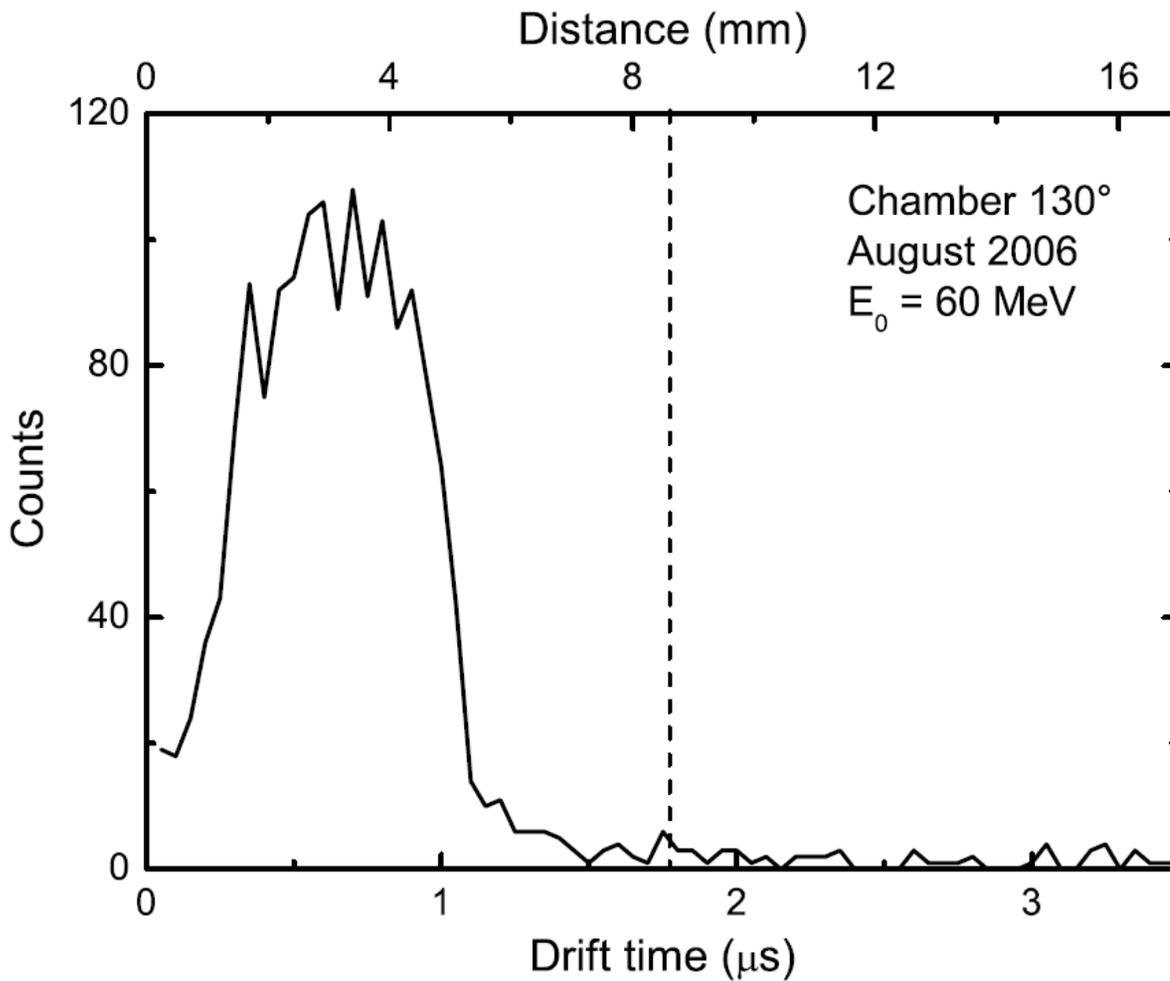
**A signal on the anode of the ionization chamber from a recoil proton**





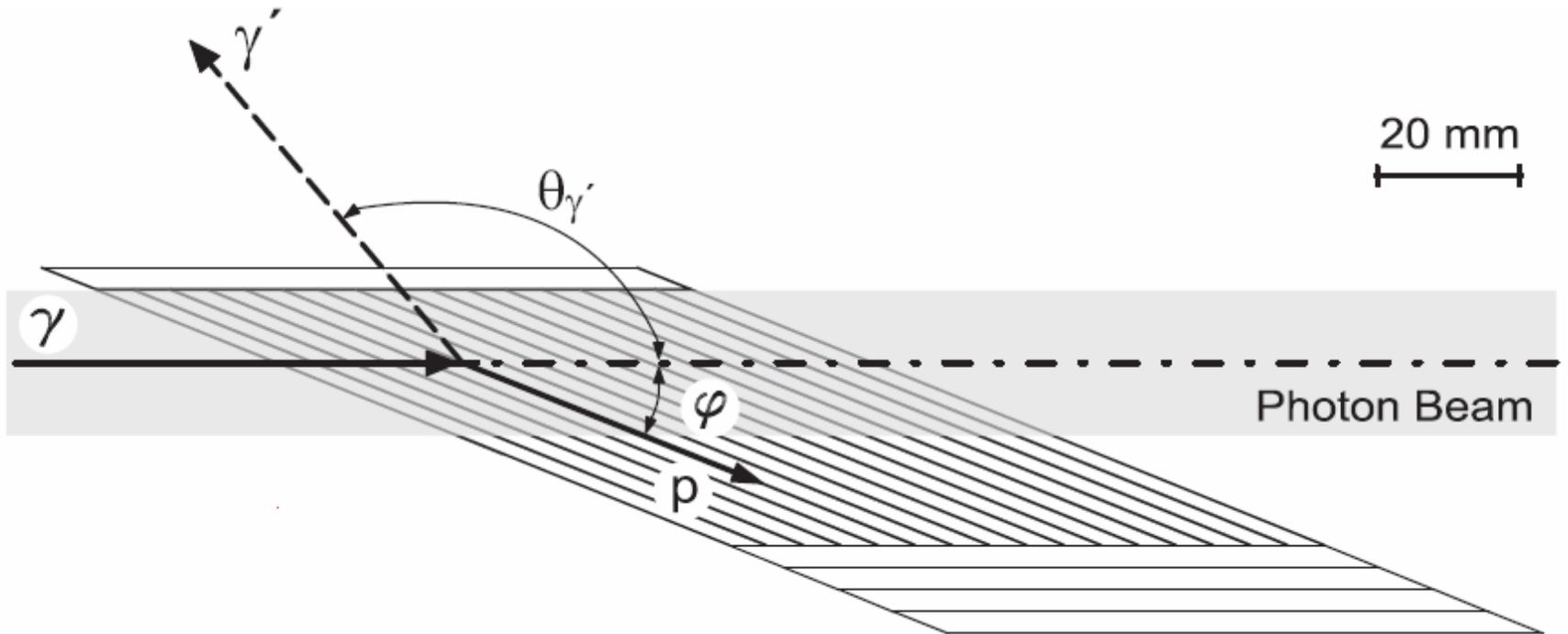
**Зависимость формы сигнала от угла трека протона для энергий протона 1 МэВ (—), 4 МэВ (···) и 8 МэВ (- -)**

# Drift-time distribution of signals from recoil protons



Drift velocity is  $\sim 5 \text{ mm}/\mu\text{s}$

## Anode-strips geometry (top view)



## Main parameters of the ionization chambers

---

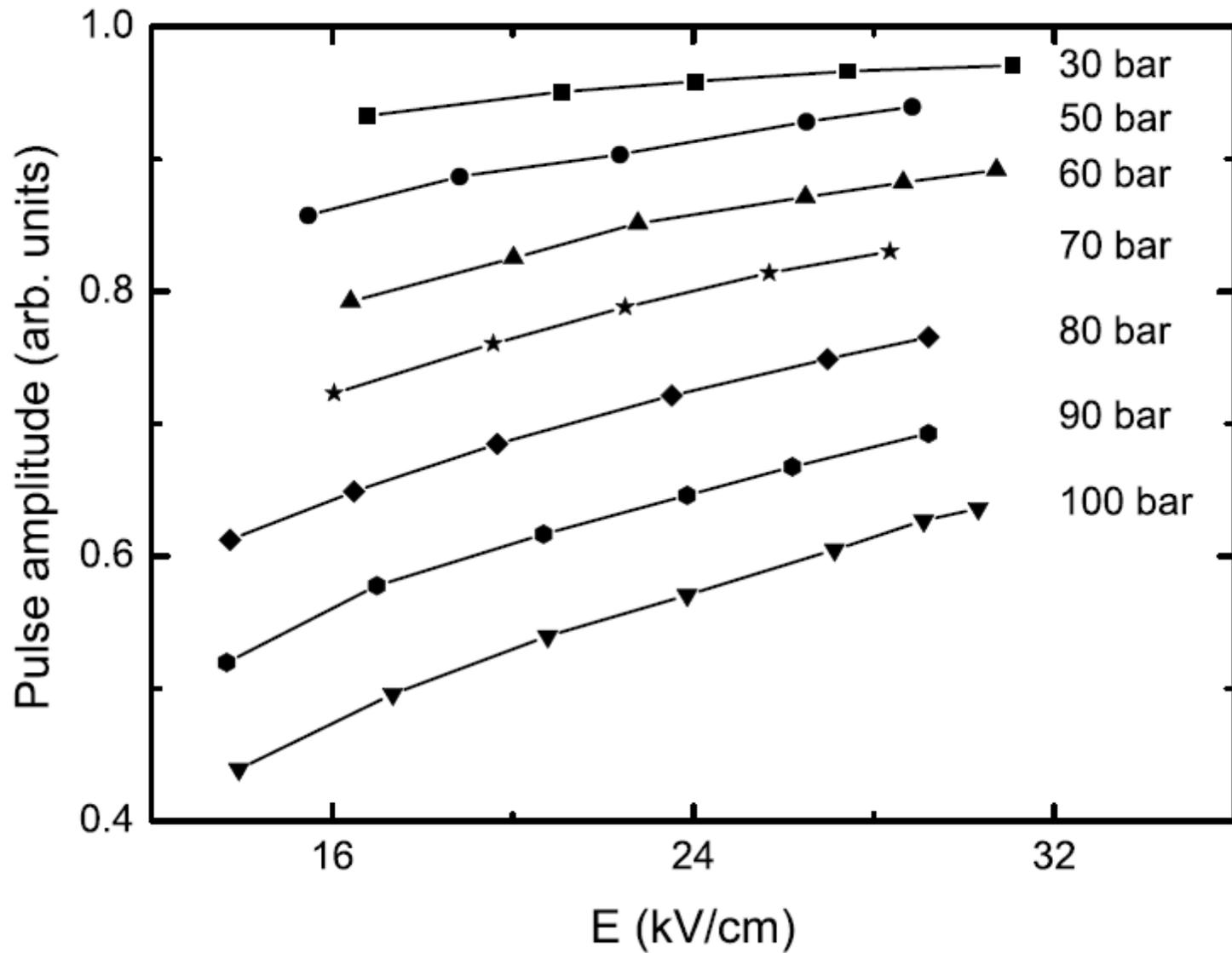
---

Pressure (bar)	$\leq 80$
Target area (mm <sup>2</sup> )	$20 \times 10$
Target thickness (mm)	80
Strip width (mm)	2.5
Strip length (mm)	60
Number of anode strips (Chamber 90)	21
Number of anode strips (Chamber 130)	13
Distance between strips (mm)	0.3
Distance anode - grid (mm)	1.0
Distance grid - cathode (mm)	17.0
Anode voltage (kV)	0
Grid voltage (kV)	up to -5.0
Cathode voltage (kV)	up to -60
Proton energy (MeV)	0.4 – 8

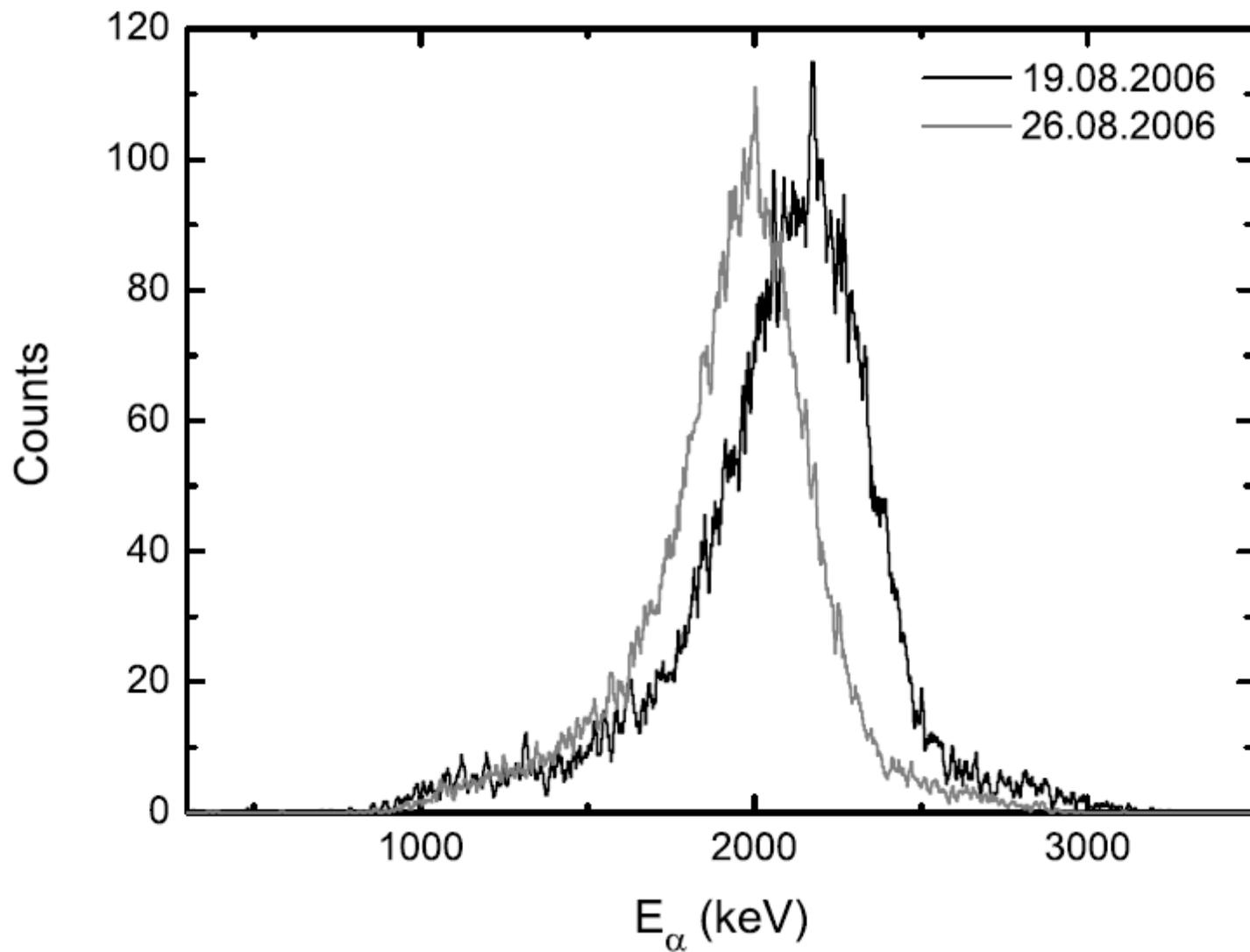
---

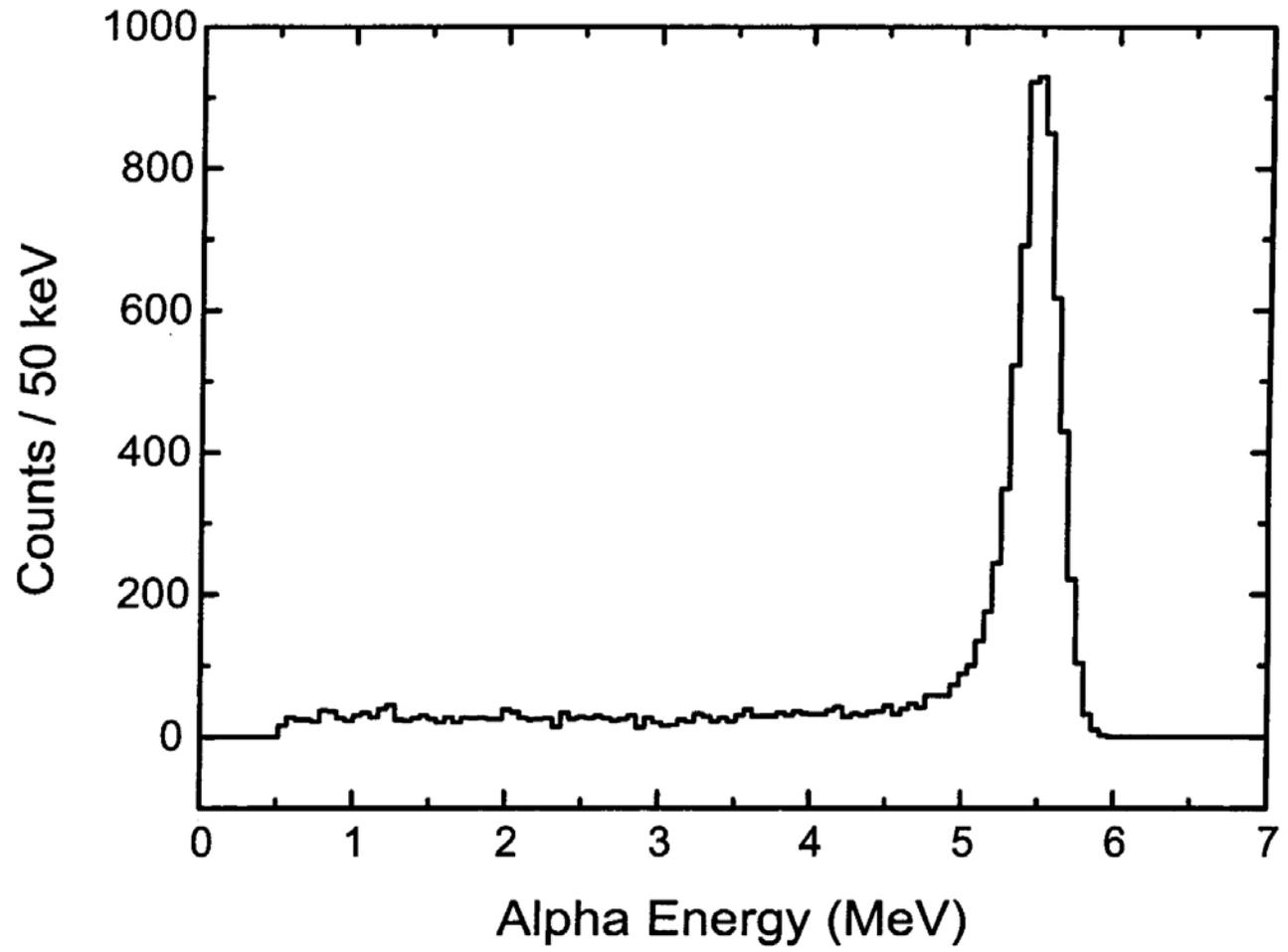
---

# Electron-ion recombination for $\alpha$ -particles at various gas pressure



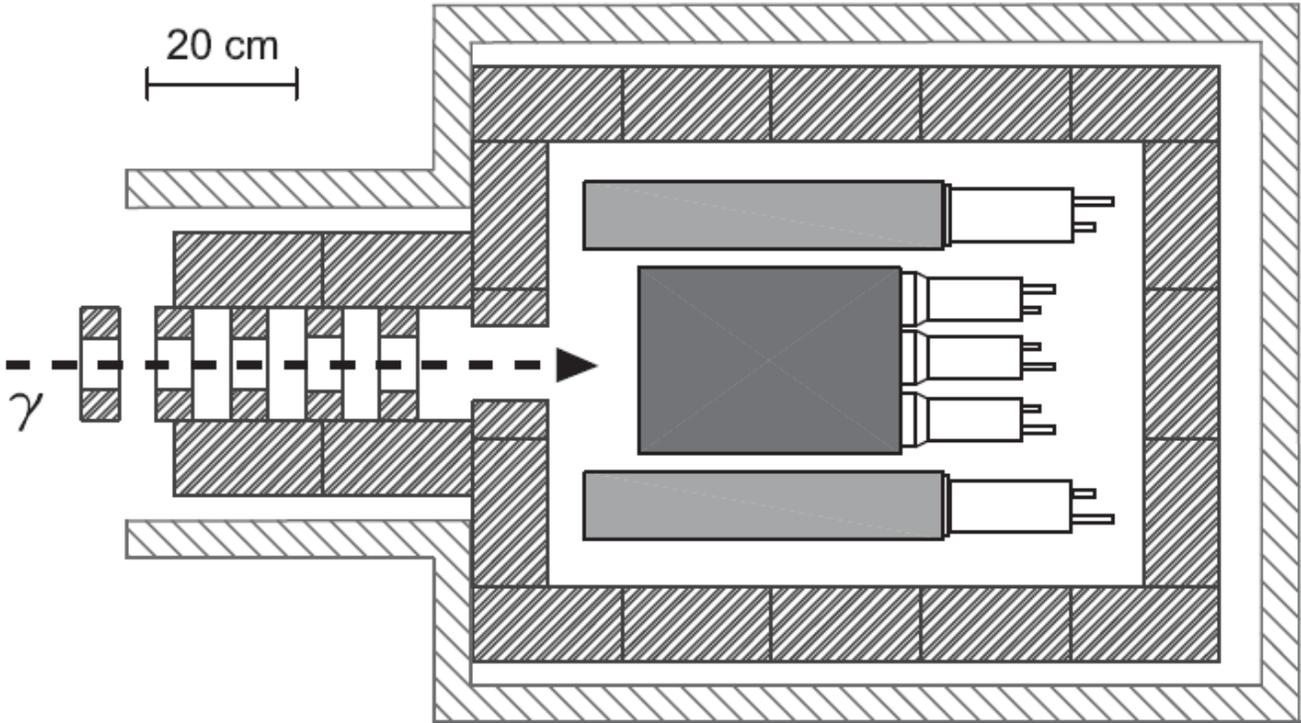
## Reduction of the signal amplitudes from $^{237}\text{Pu}$ $\alpha$ -source due to impurities

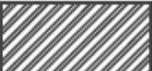




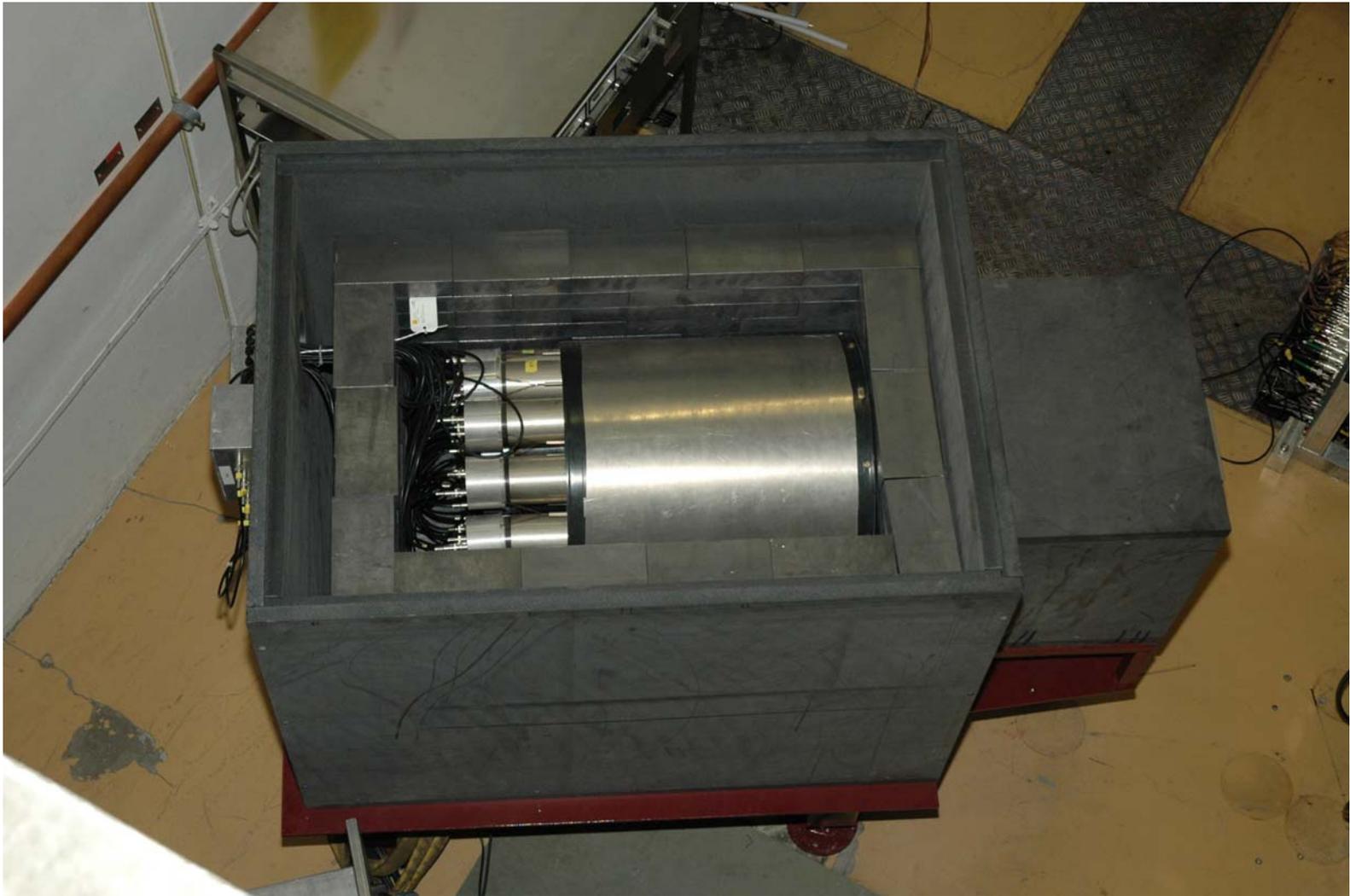
( $^{241}\text{Am}$ )

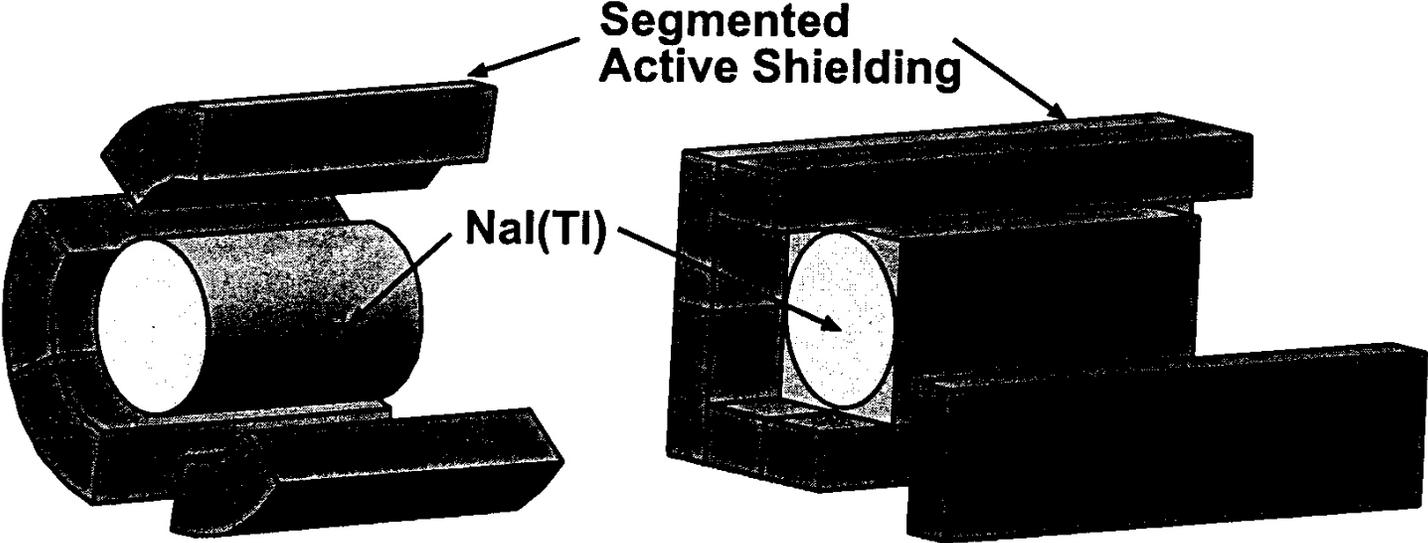
# Schematic view of a 10" x 14" NaI(Tl) spectrometer



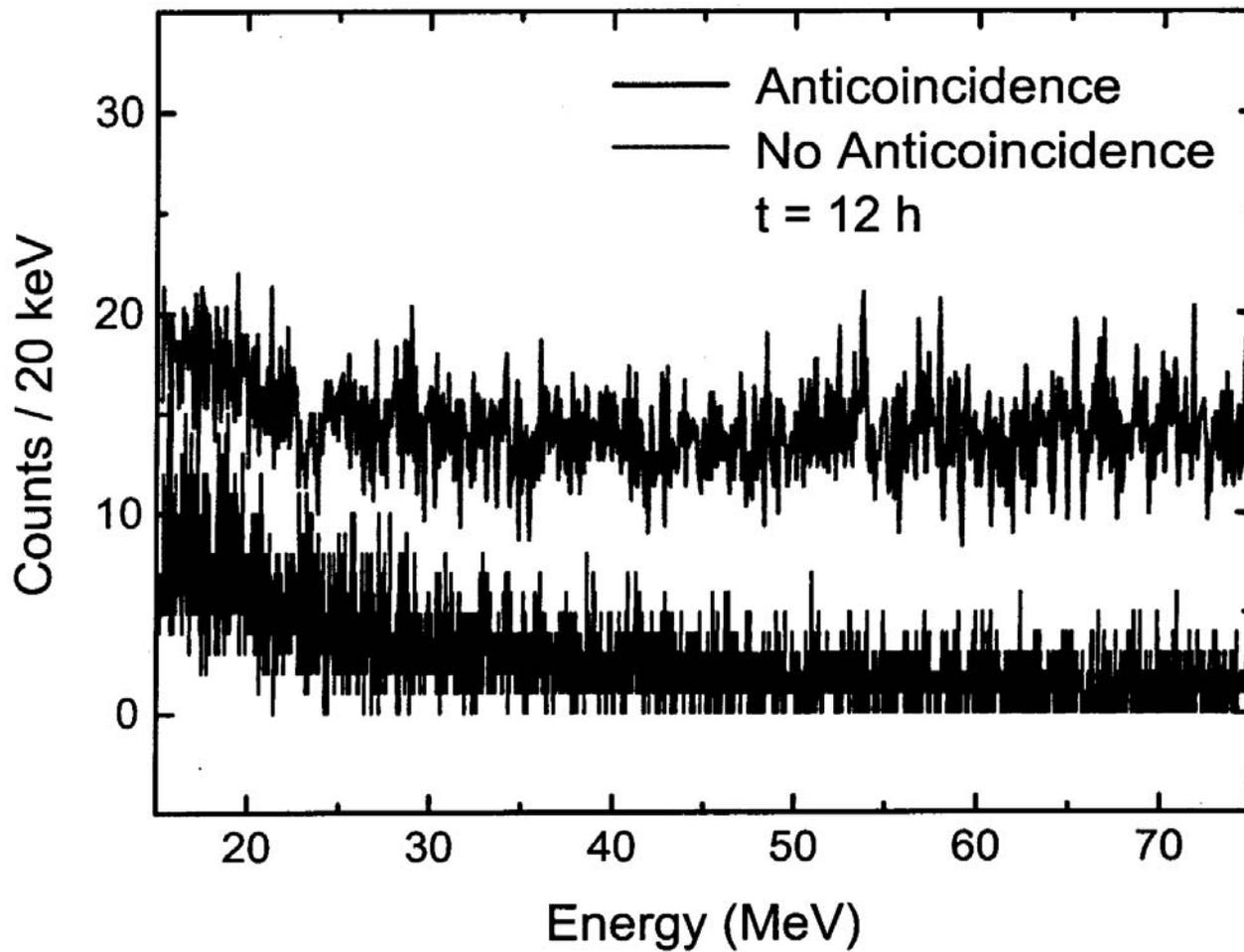
-  NaI(Tl) Crystal
-  Lead
-  Plastic Scintillator
-  Boron treated Polyethylene

# Nal(Tl) spectrometer

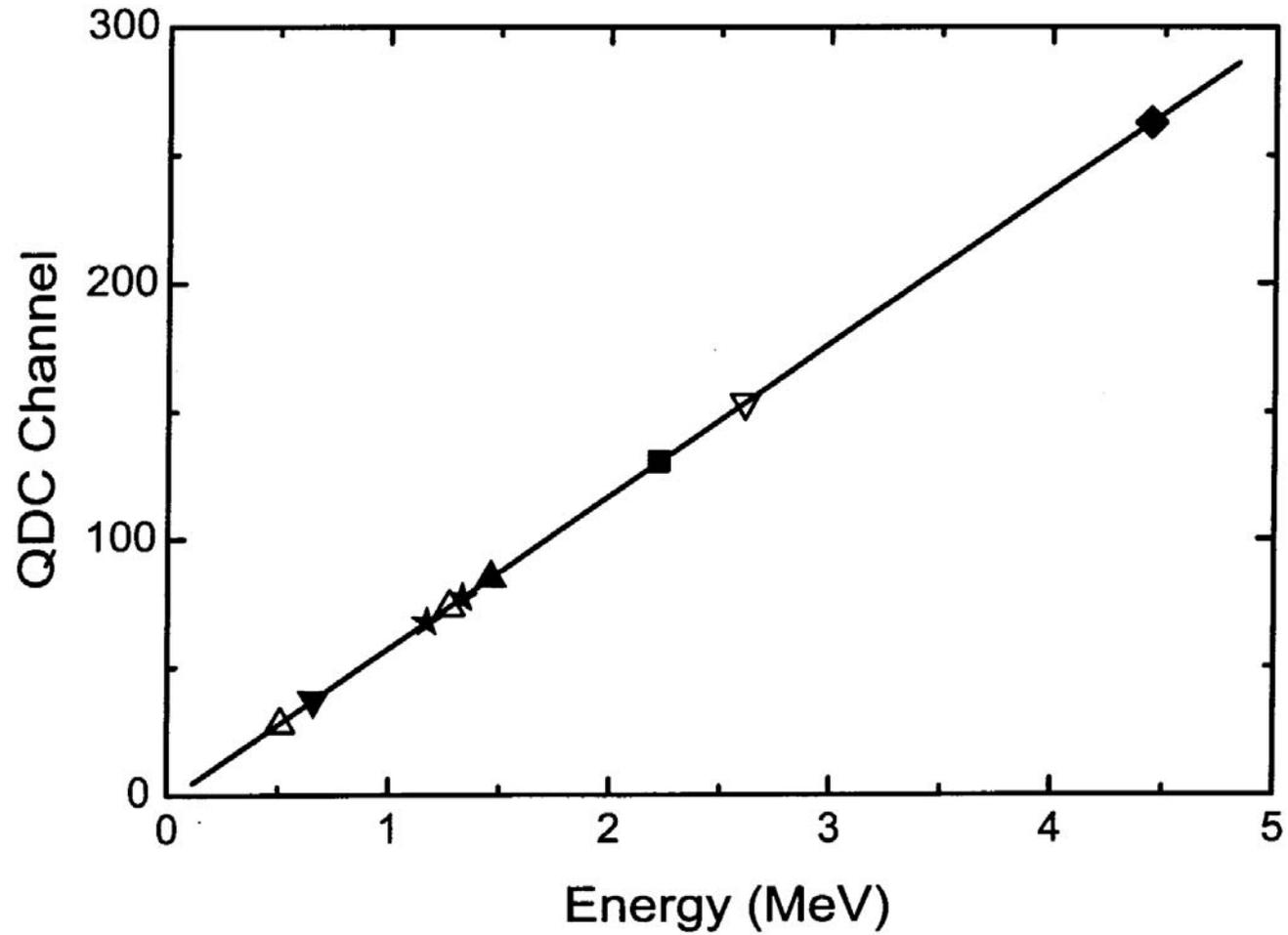




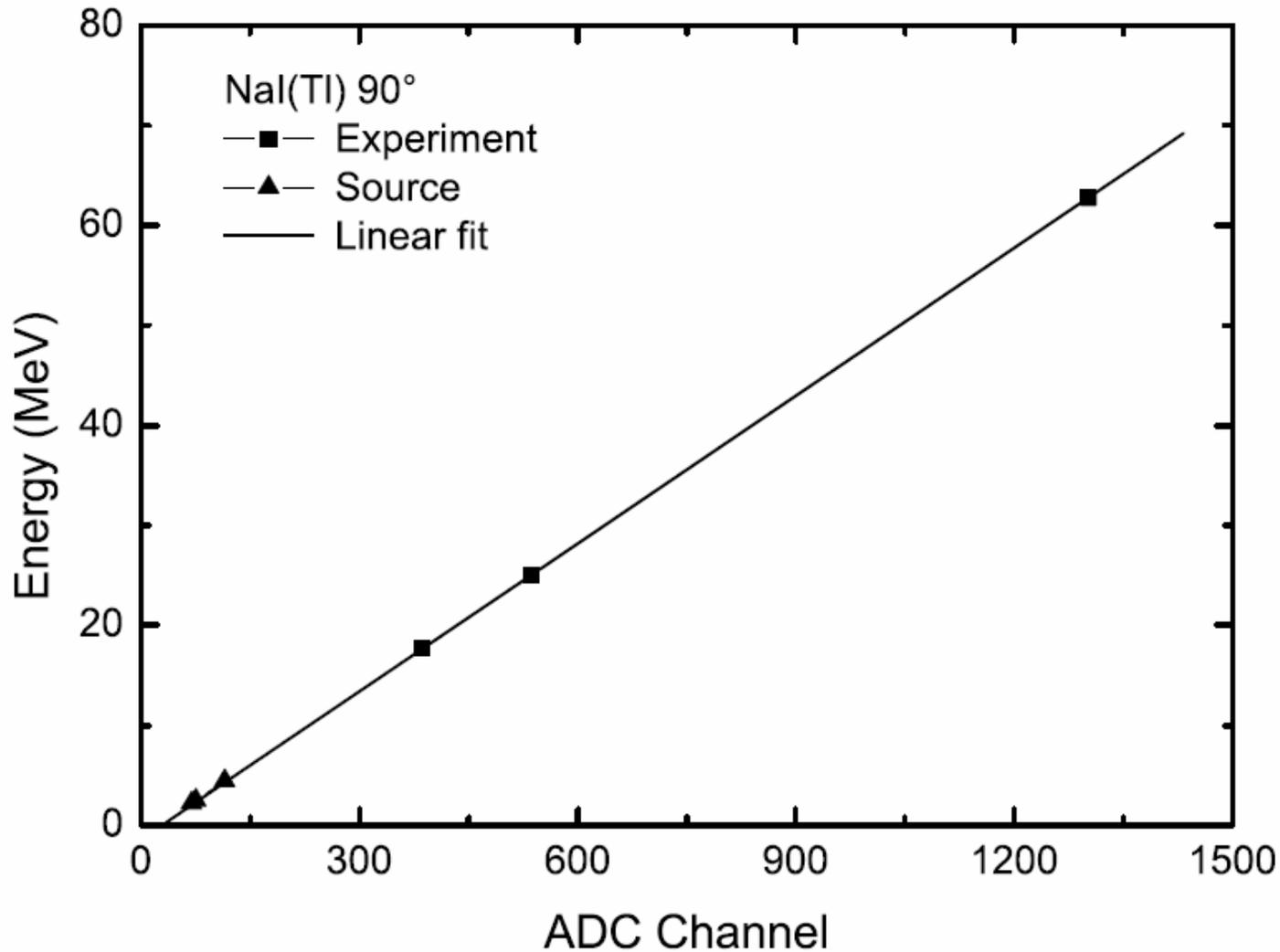
## Энергетические спектры событий в NaI детекторах от космических лучей



## Energy calibration of one of the NaI spectrometers

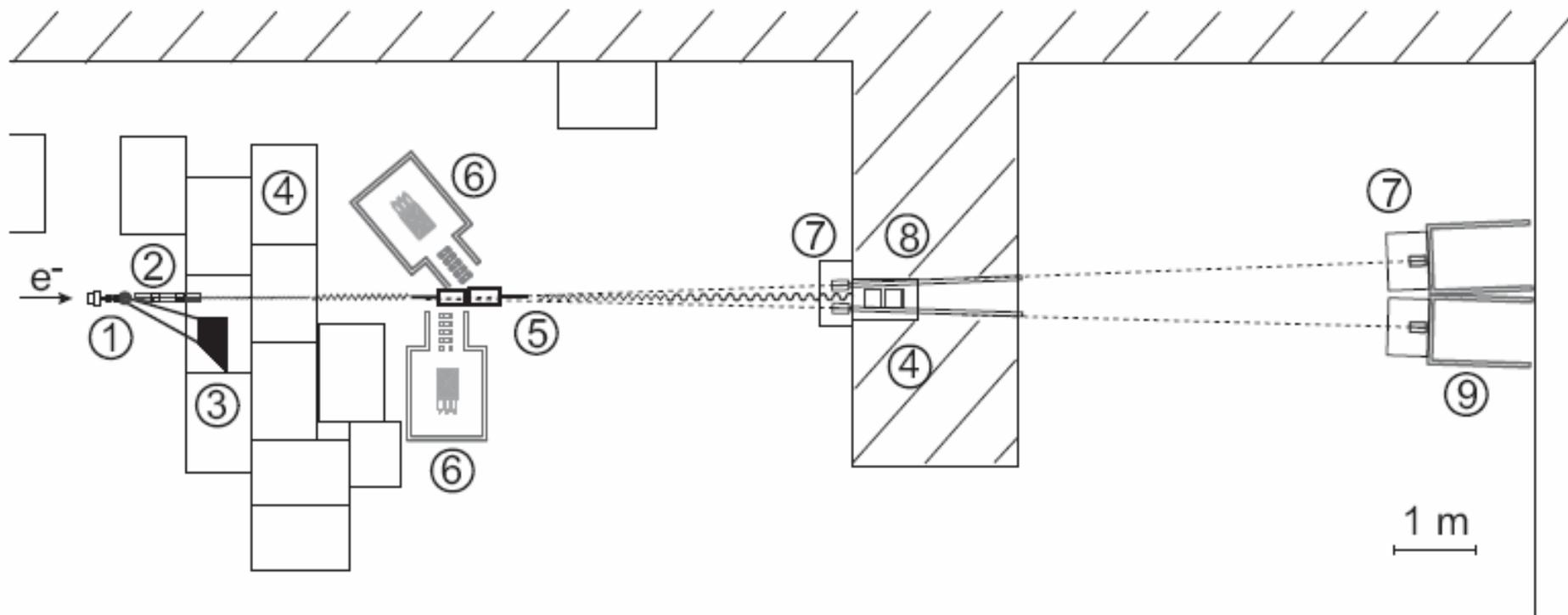


## Energy calibration of one of the NaI spectrometers



▲ –  $^{60}\text{Co}$  (1.3 MeV) and Am-Be (4.4 MeV)  $\gamma$  sources; ■ – calibration with e-A scattering

## Schematic view of the experimental setup

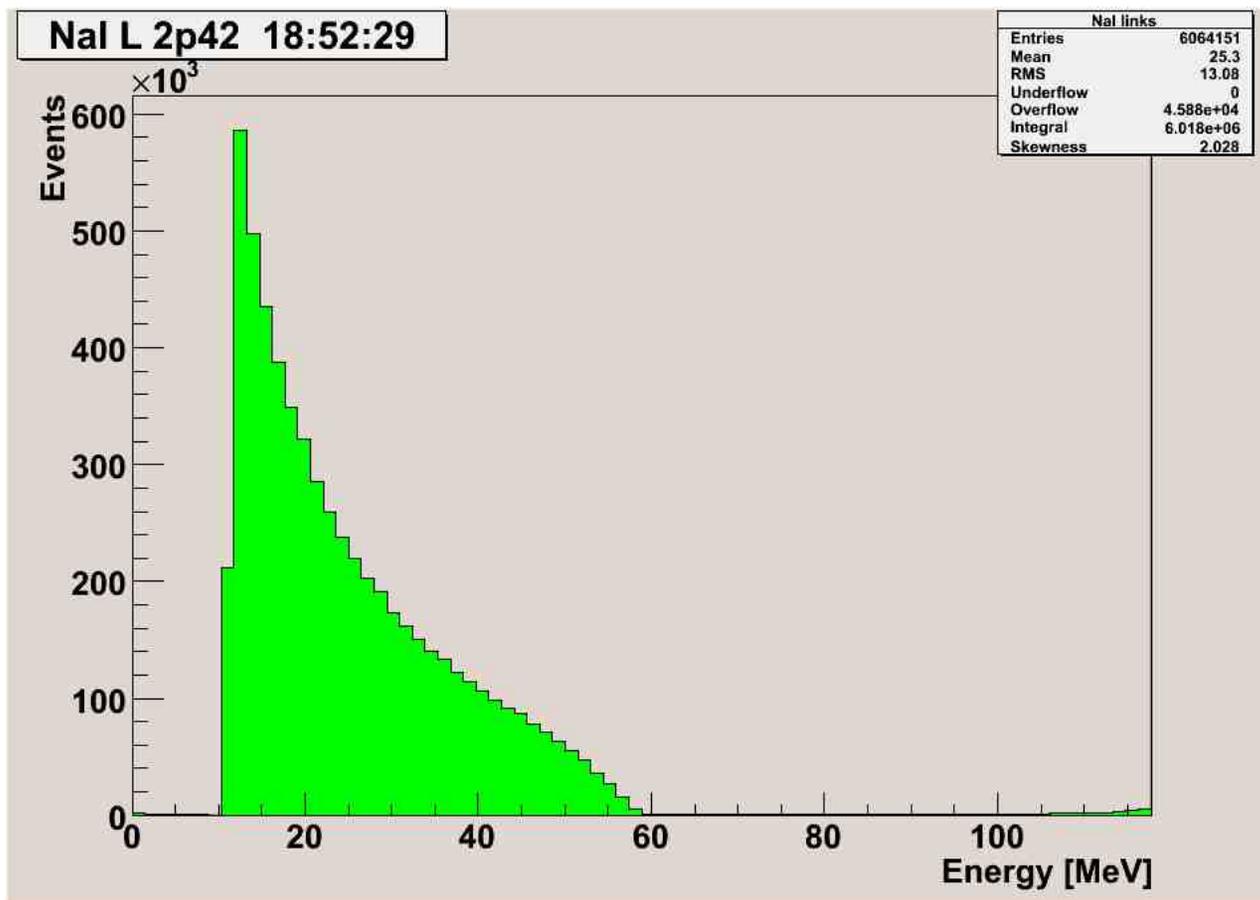


1 – bremsstrahlung converter, 2 – collimation system, 3 – electron beam dump, 4 – concrete shielding, 5 – hydrogen-filled ionization chambers, 6 –  $\gamma$  spectrometers, 7 – collimation system, 8 – position sensitive ionization chamber, Gaussian quantometer,  $\gamma$  beam dump, 9 –  $\gamma$  spectrometers

**Спектрометры (6) измеряют спектры фотонов, рассеянных на протонах**  
**Спектрометры (9) измеряют спектры фотонов, рассеянных на электронах**

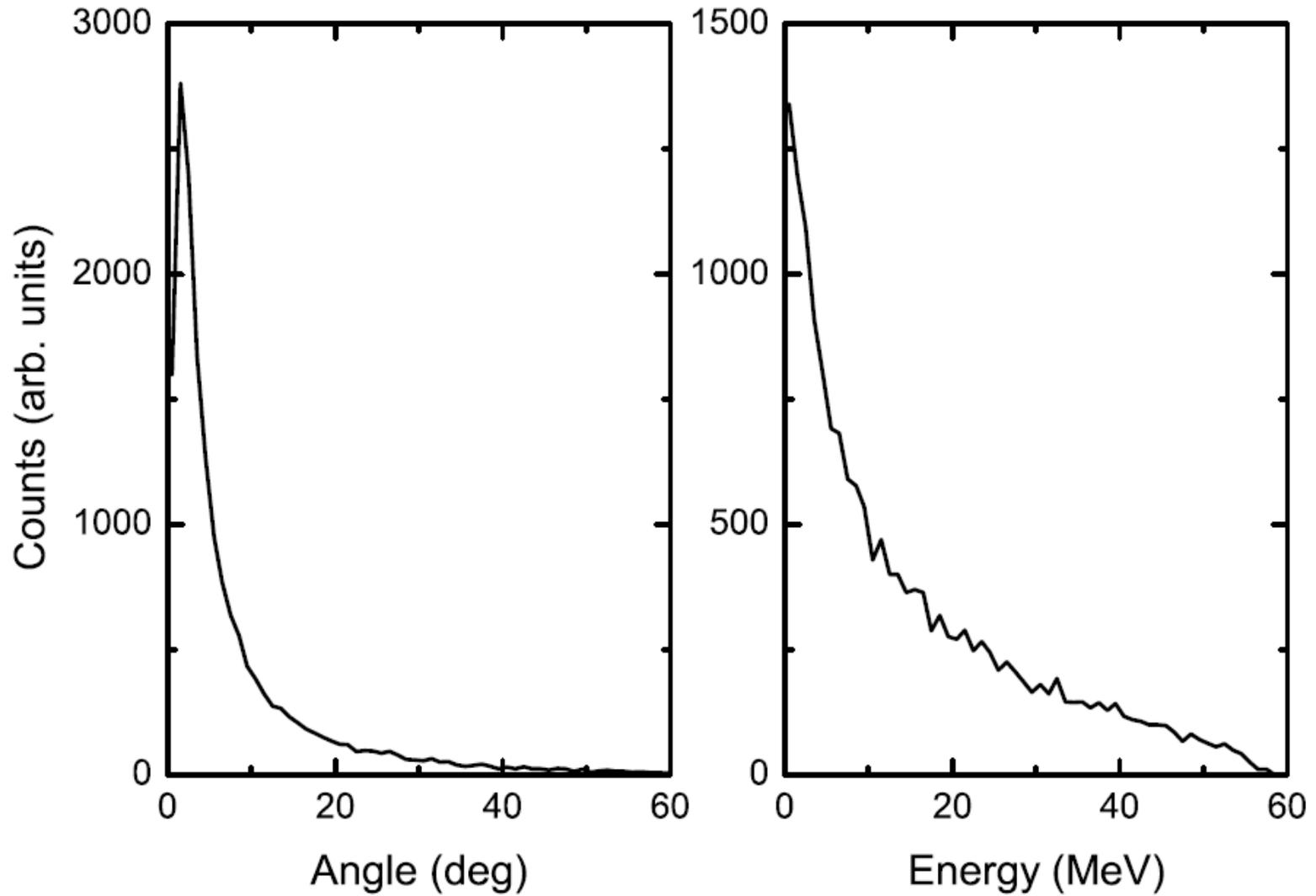
$$d\sigma/d\Omega (135^\circ) \approx 1.5 d\sigma/d\Omega (90^\circ)$$

А в эксперименте  $N(135^\circ) < N(90^\circ)$

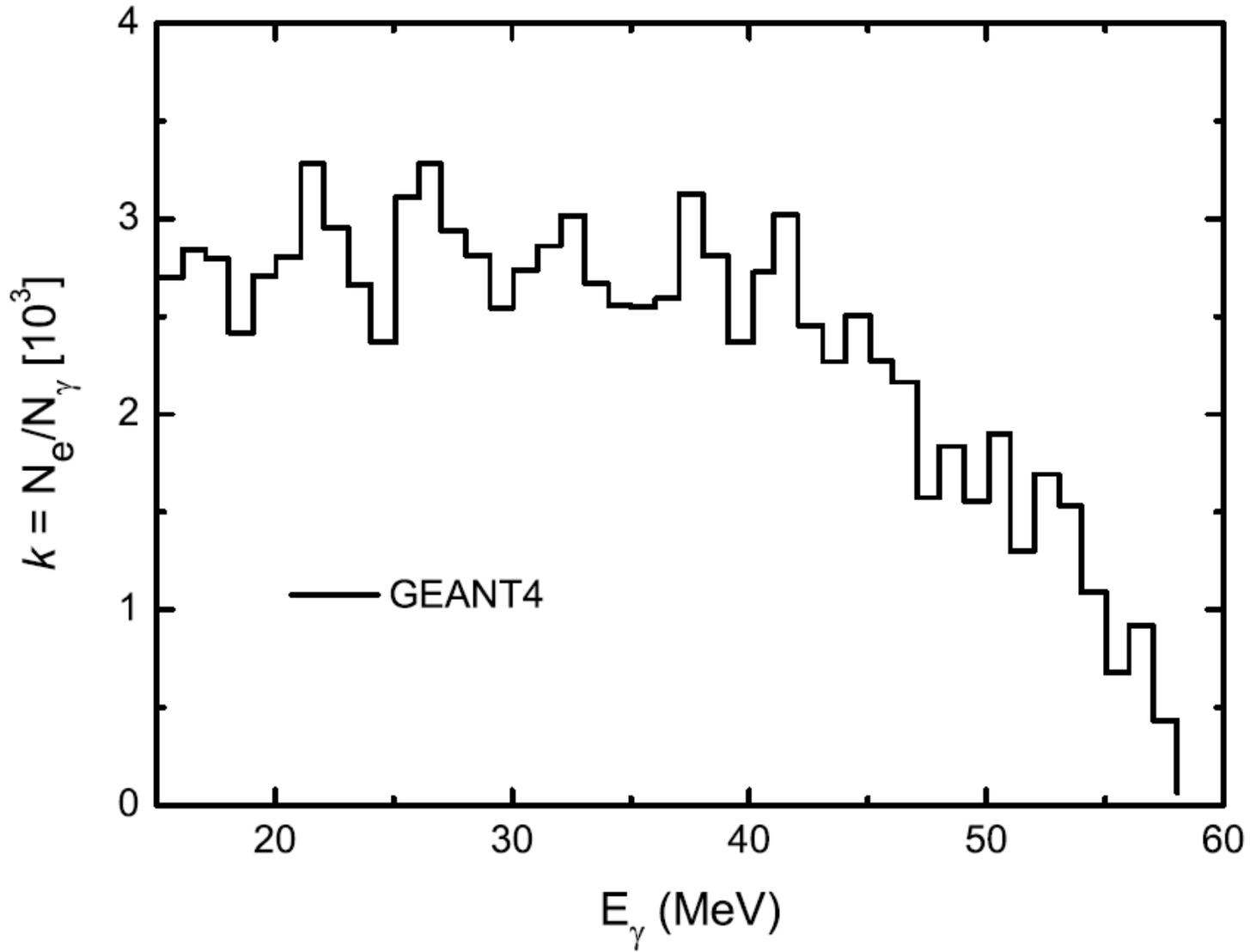


Энергетический спектр фотонов, рассеянных на малый угол.

**Angular and energy distributions of electrons ( $\sim 1.6\%$  from  $\gamma$ ) at the IC entrance**



## Ratio of $N_e/N_\gamma \times 10^3$ in the active volume of IC



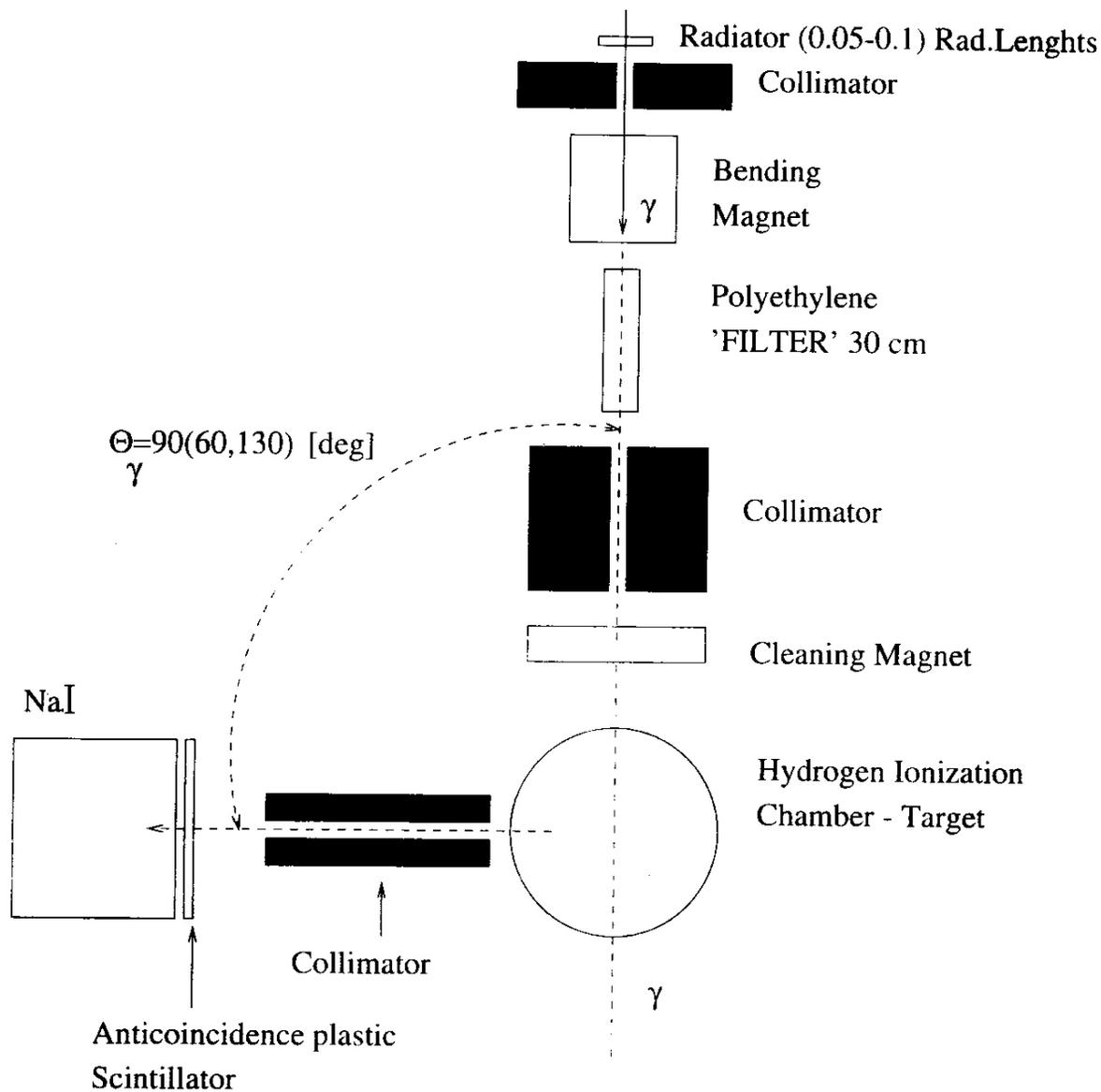


Fig.2. Plan view of the experimental layout ( $\gamma p$ -scattering).

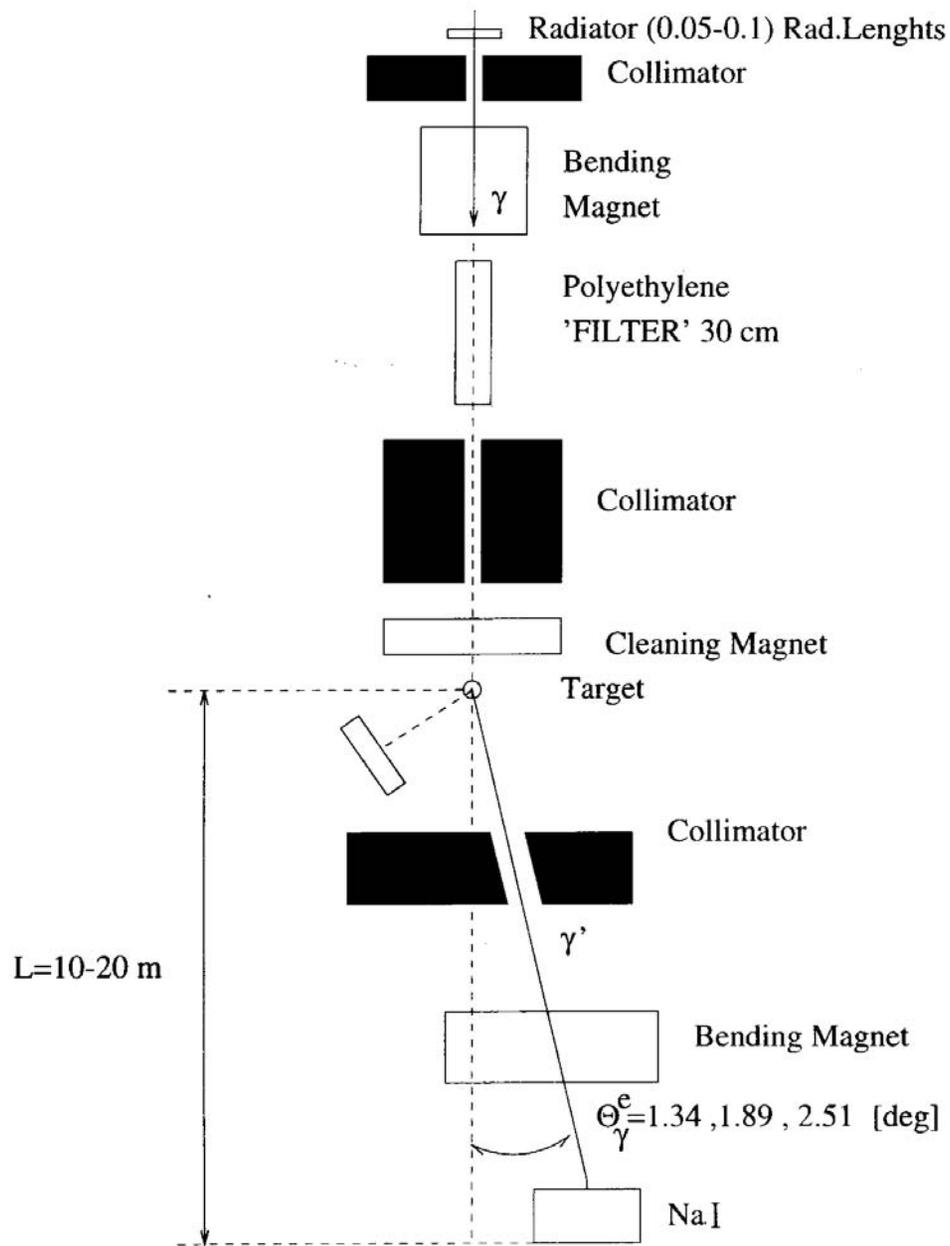
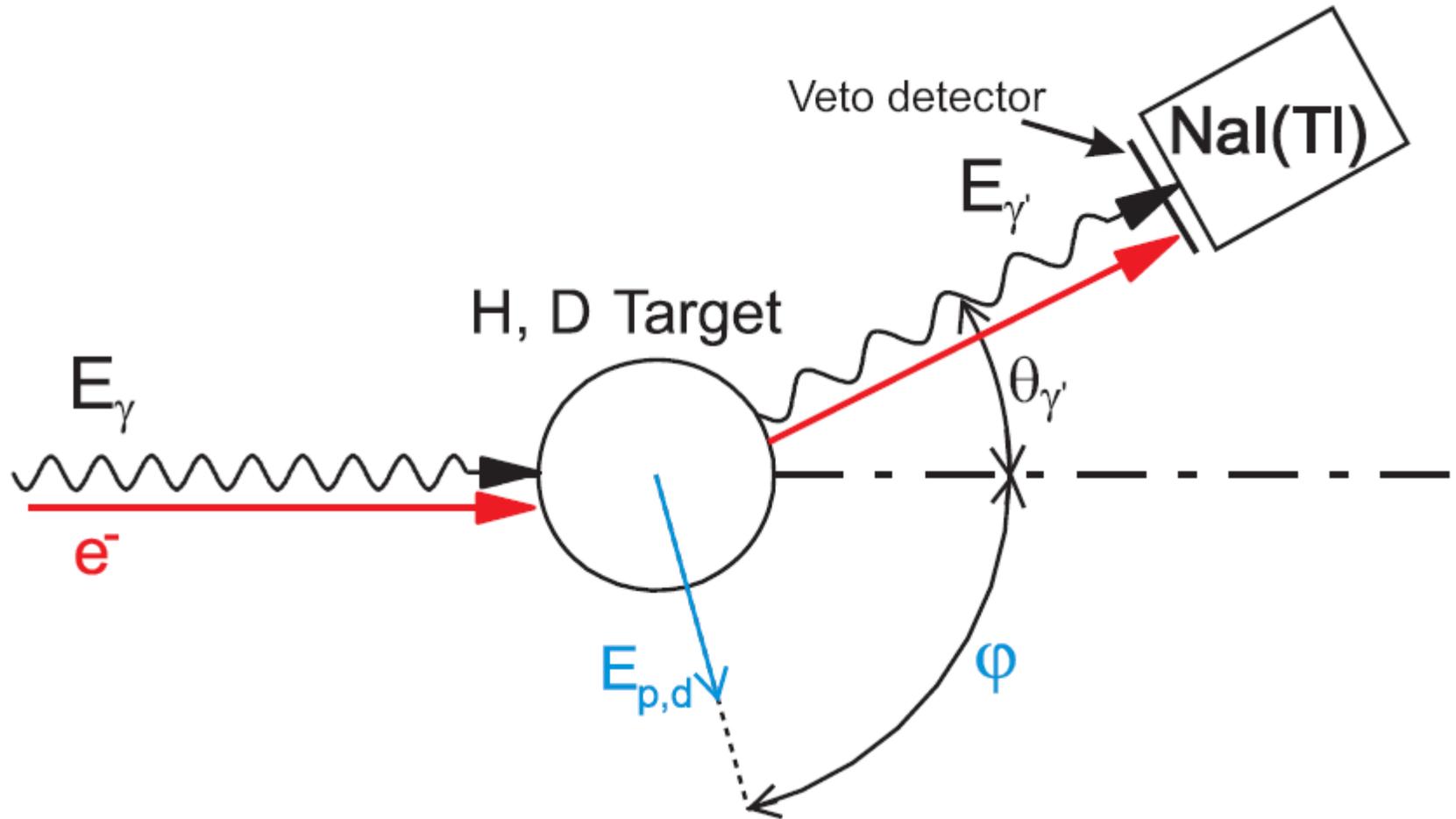
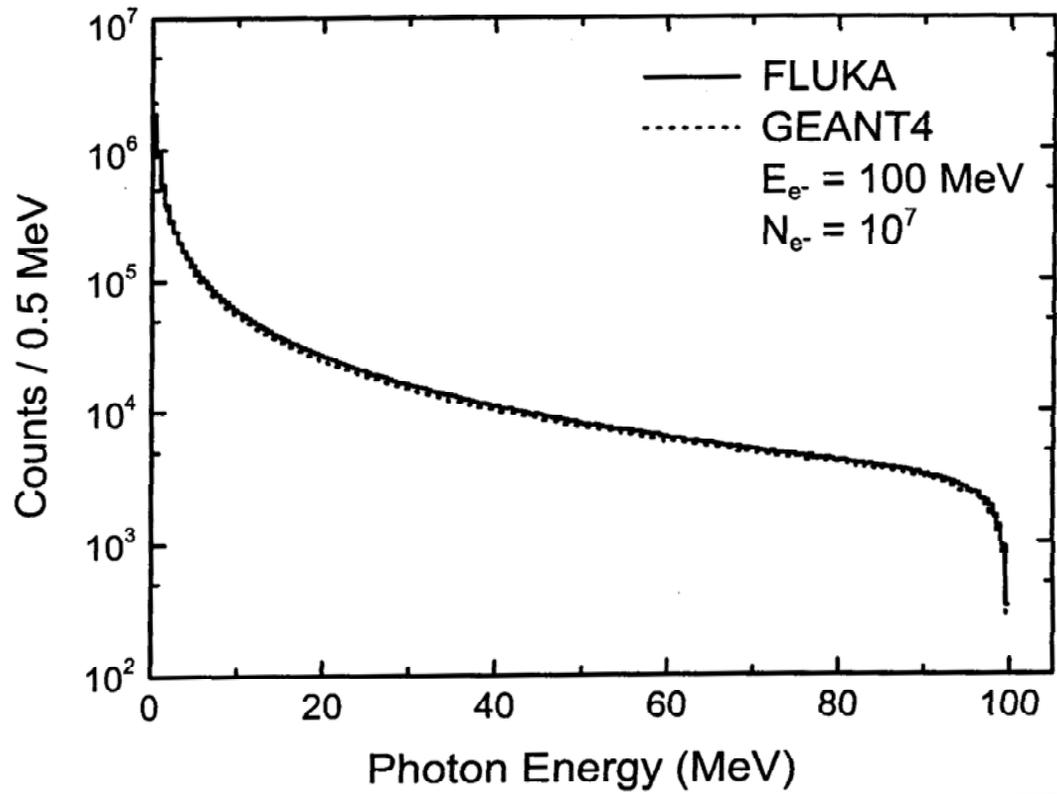


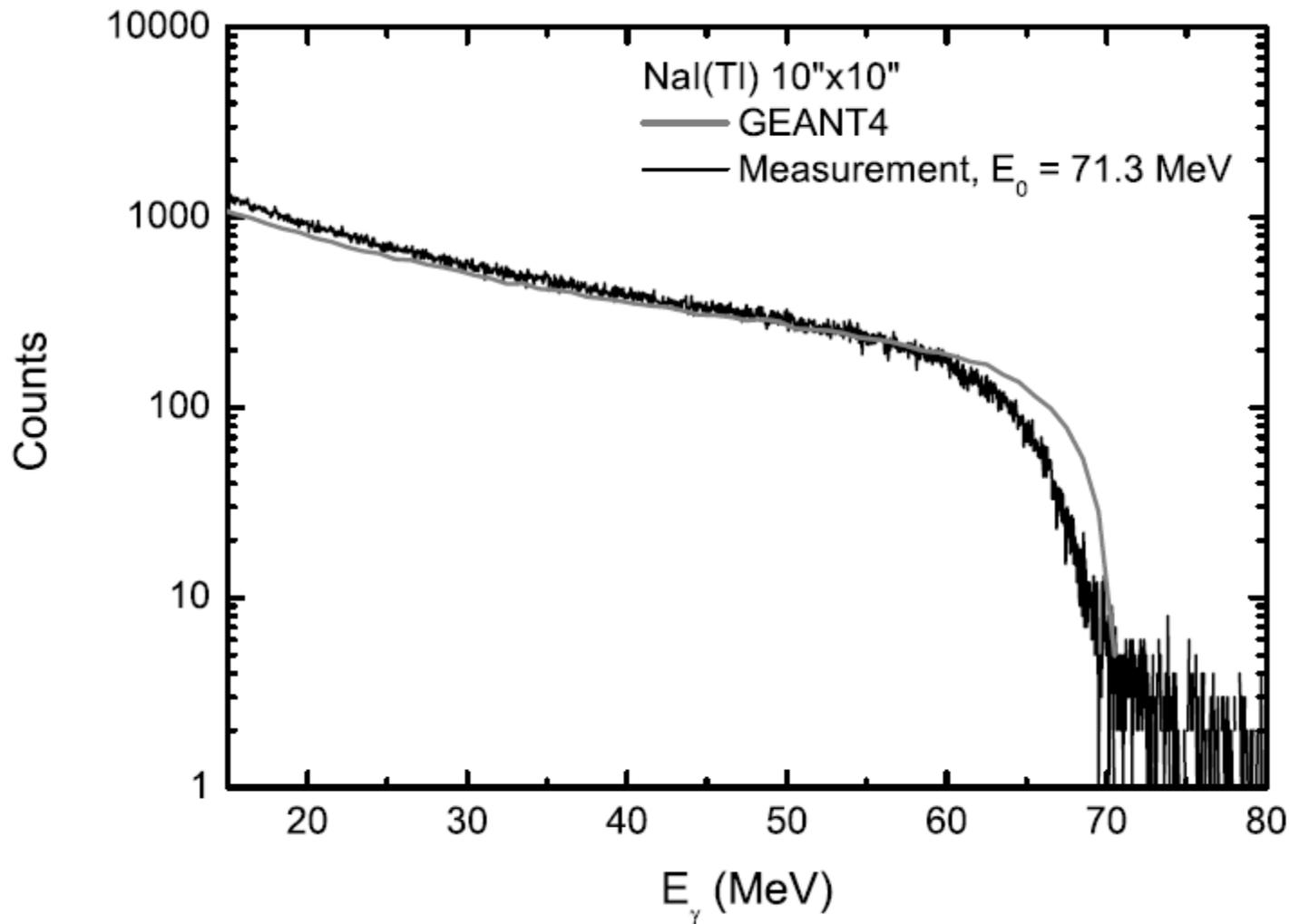
Fig.3. Plan view of the experimental layout ( $\gamma e$ -scattering).

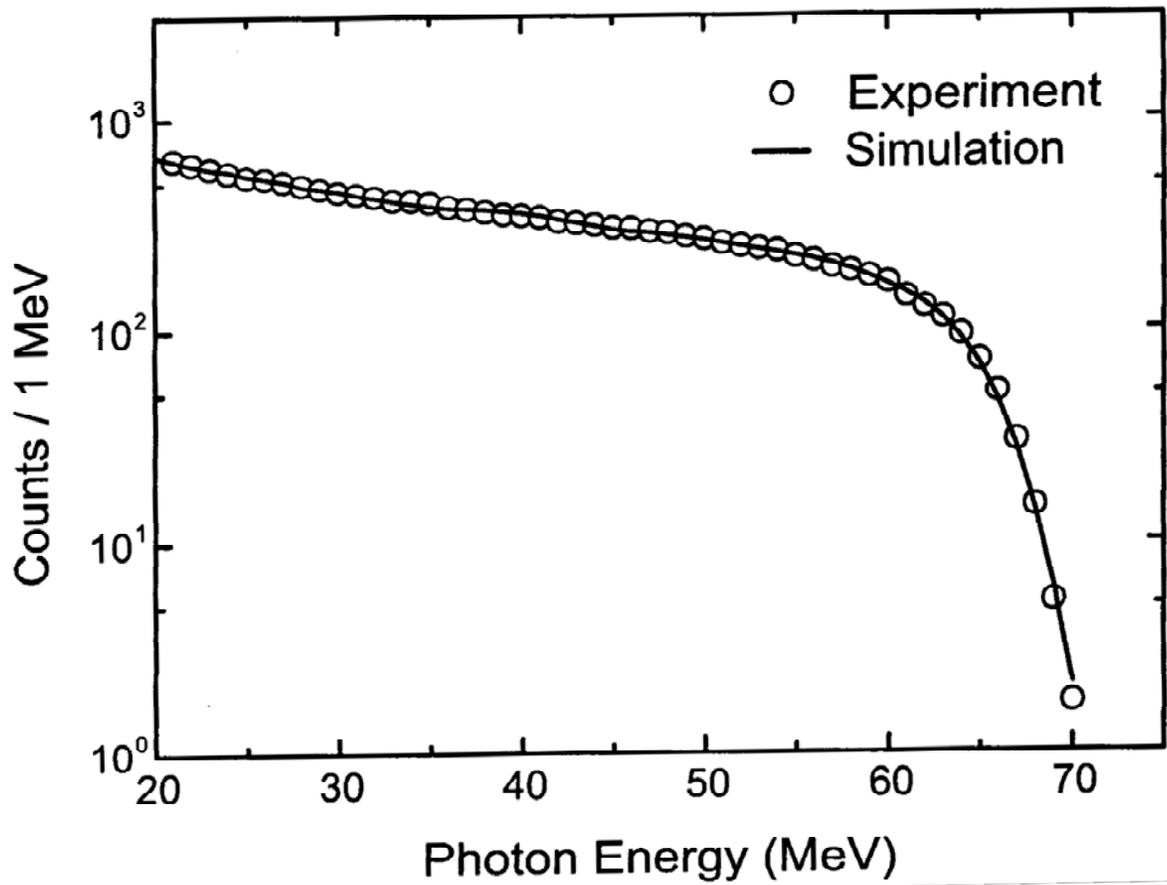
**Veto detector before the NaI spectrometer  
to exclude background from electrons ( ~5% )**



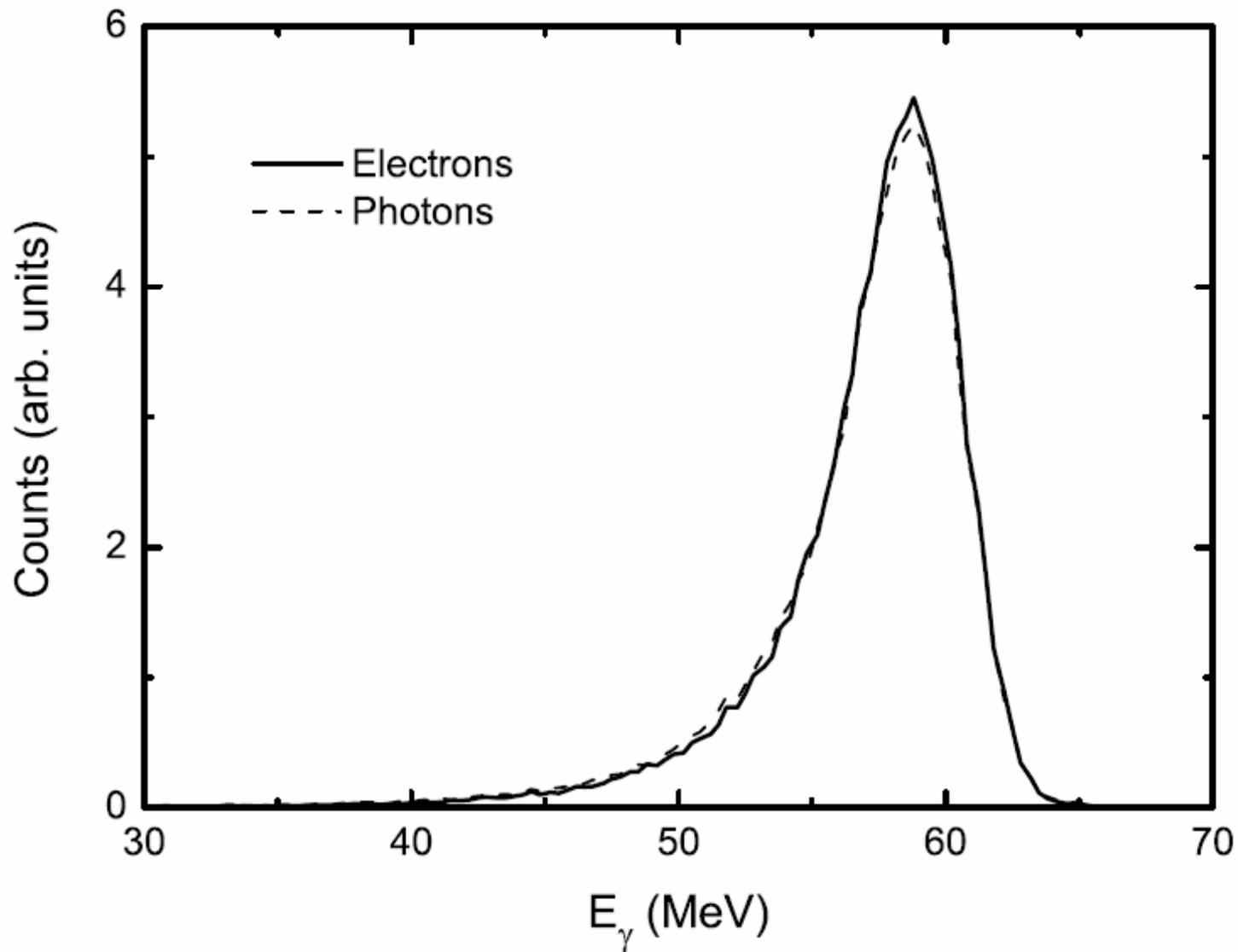


# Bremsstrahlung spectrum of photons ( $E_e=71$ MeV)

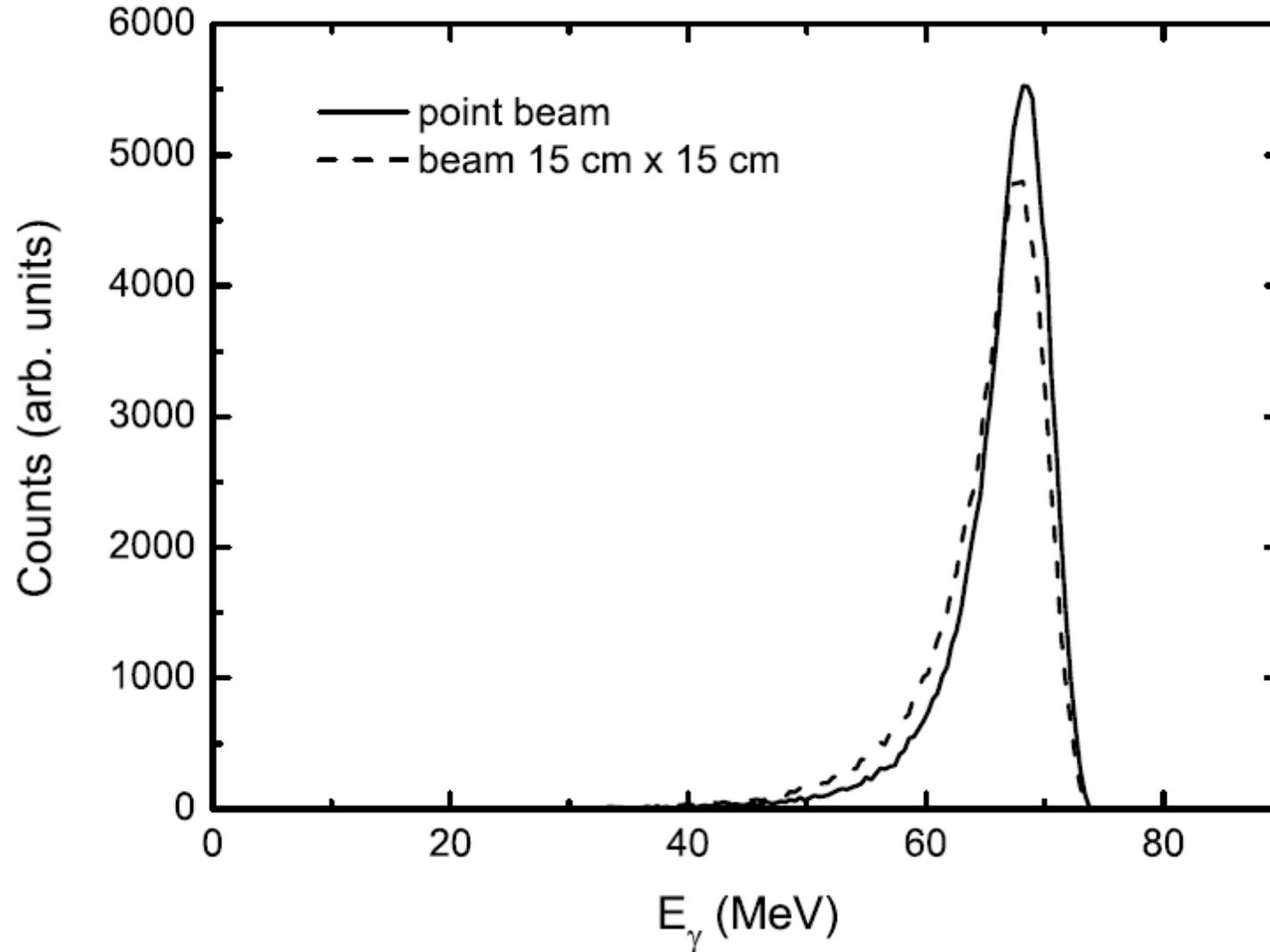




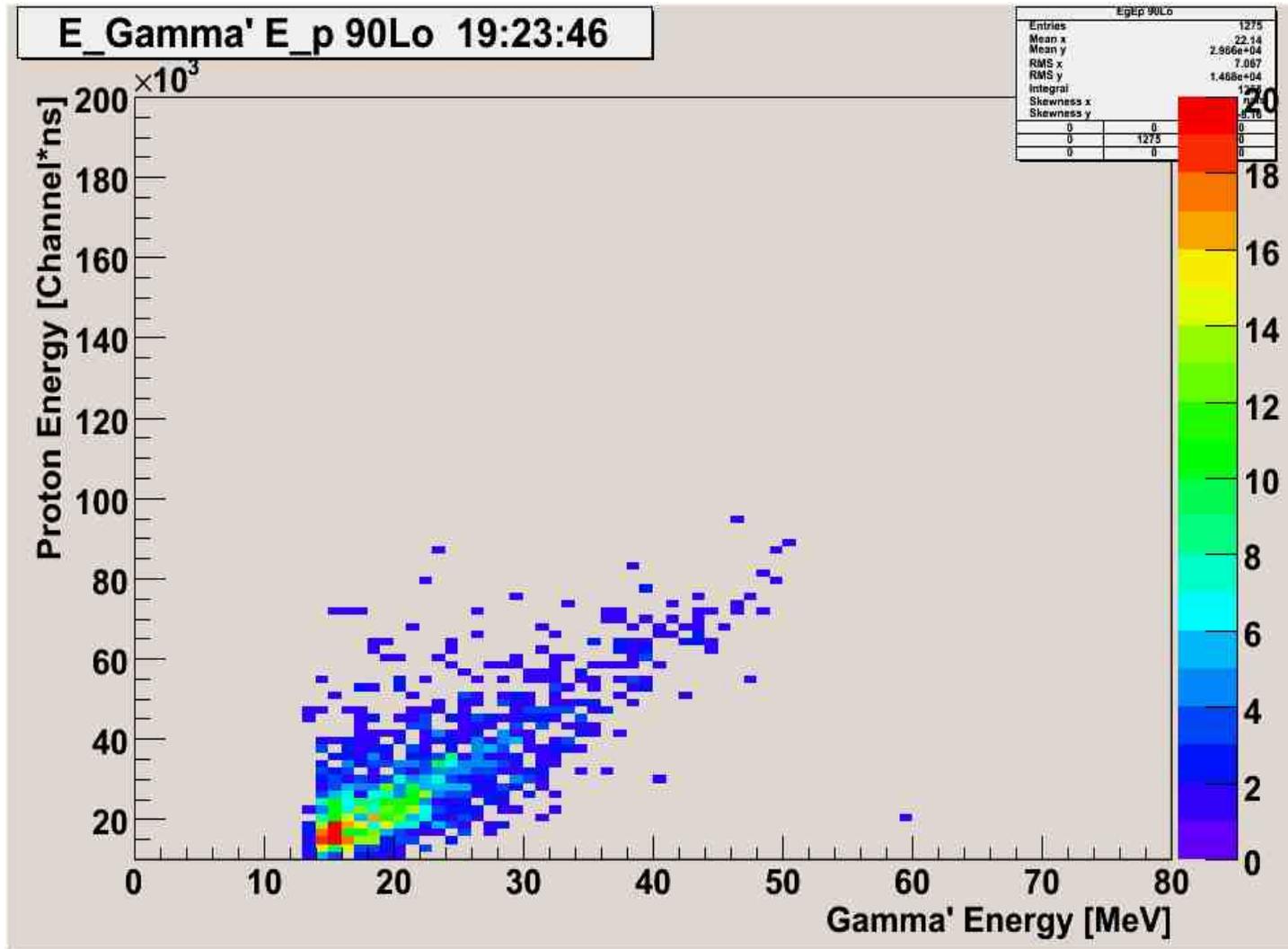
# Response function for a 10" x 14" NaI detector for $E_\gamma=60$ MeV



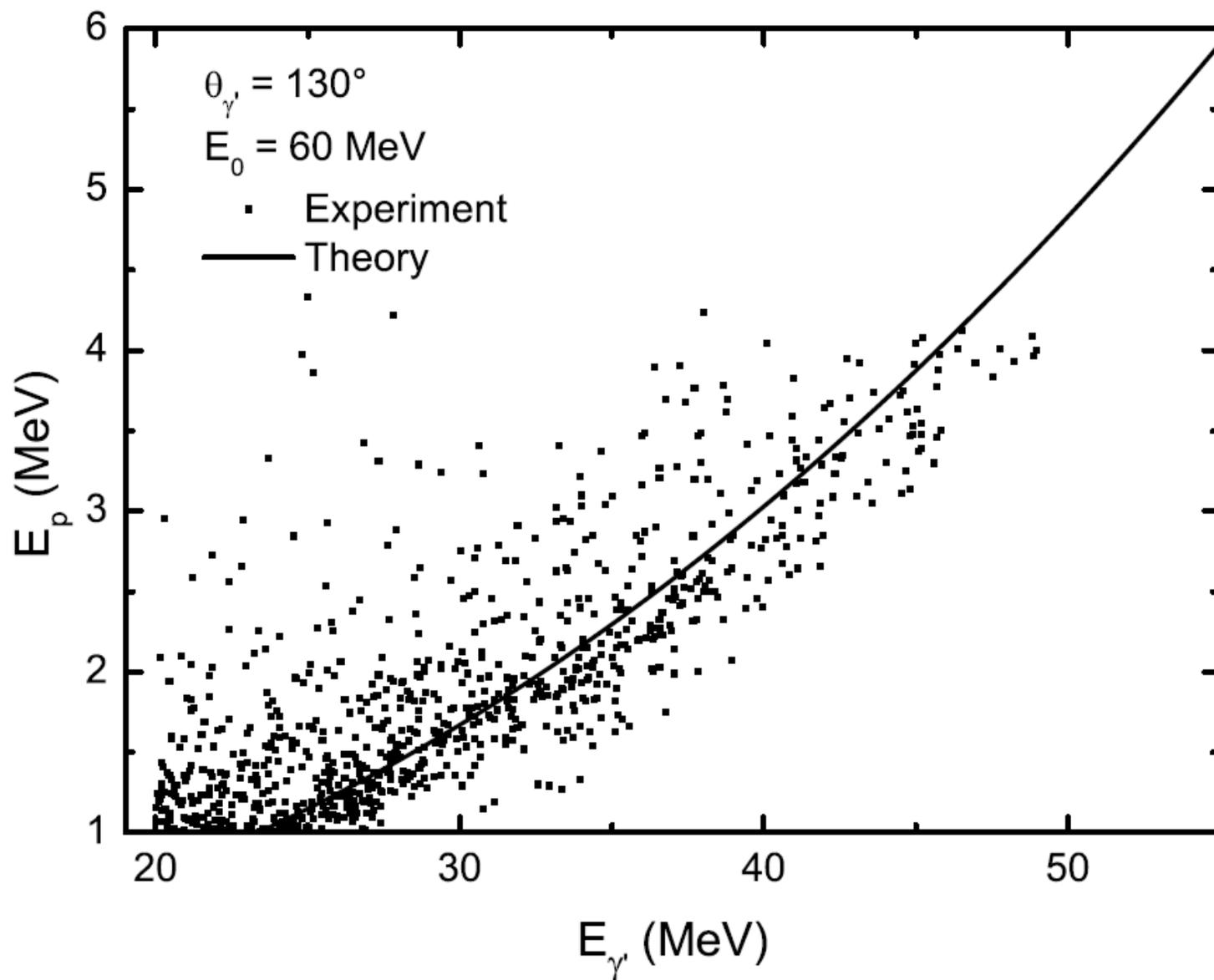
## Response functions for a 10" x 14" NaI detector for $E_\gamma = 70$ MeV



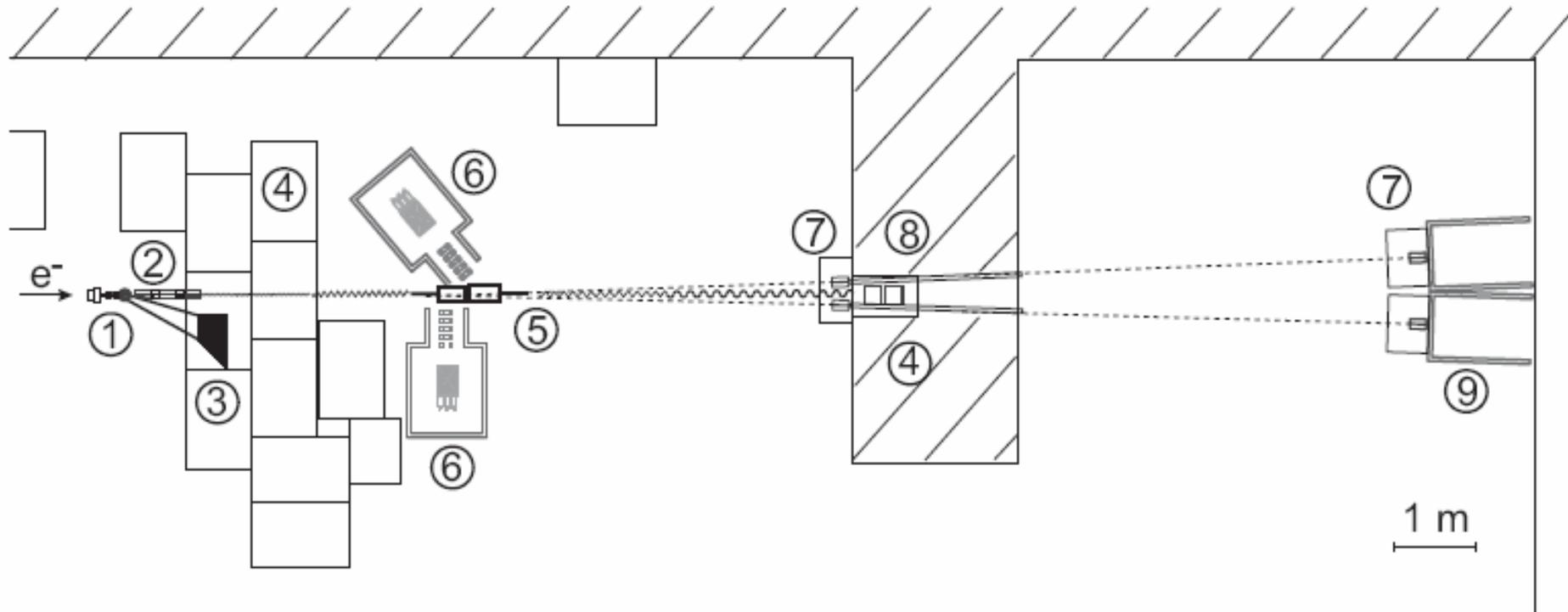
# $E_p - E_\gamma$ correlation



## $E_p - E_\gamma$ correlation

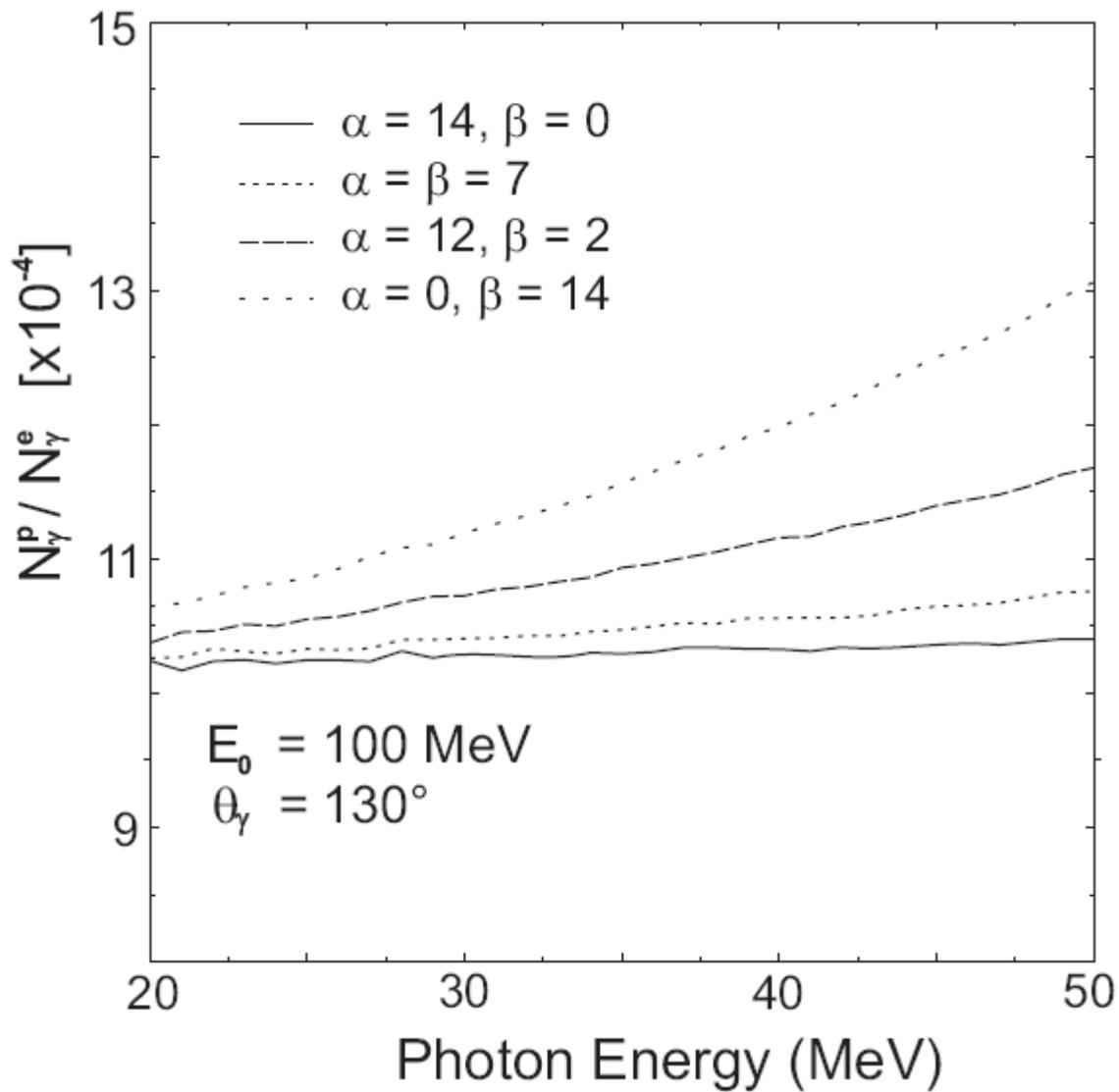


## Schematic view of the experimental setup



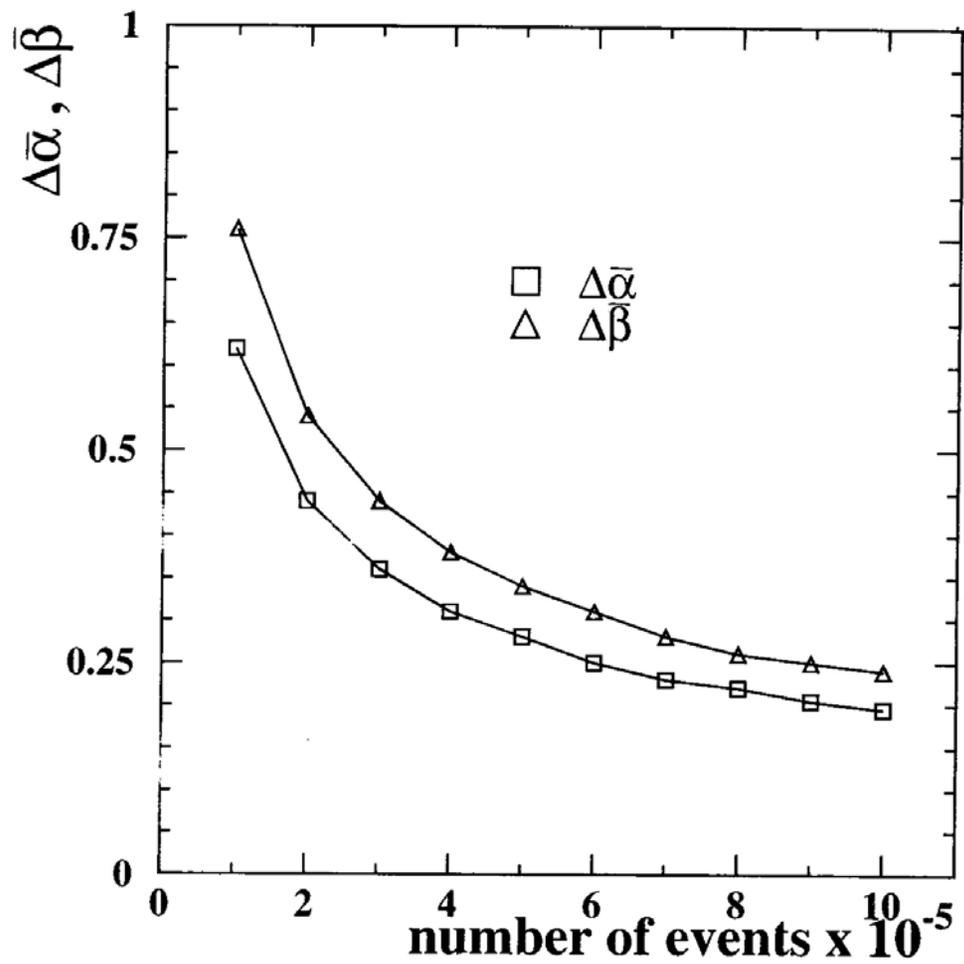
Спектры, измеряемые спектрометрами (6) можно поделить на спектры, измеряемые спектрометрами (9). В отношении этих спектров останется только энергетическая зависимость, связанная с вкладом от поляризуемости нуклона.

Для определения величин поляризуемости нуклона можно также использовать отношение спектров, измеряемых  $\gamma$ -спектрометрами под углами  $130^\circ$  и  $90^\circ$ .

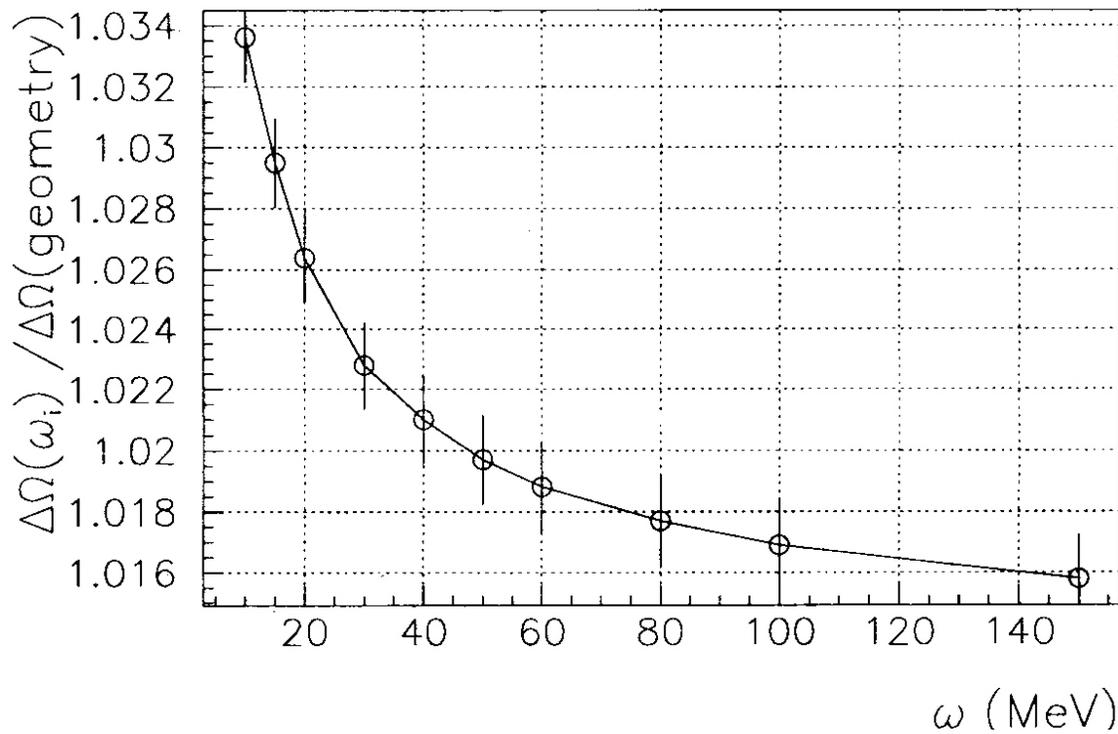


Отношения спектров фотонов в NaI детекторе (6) к соответствующим спектрам в NaI детекторах (9)

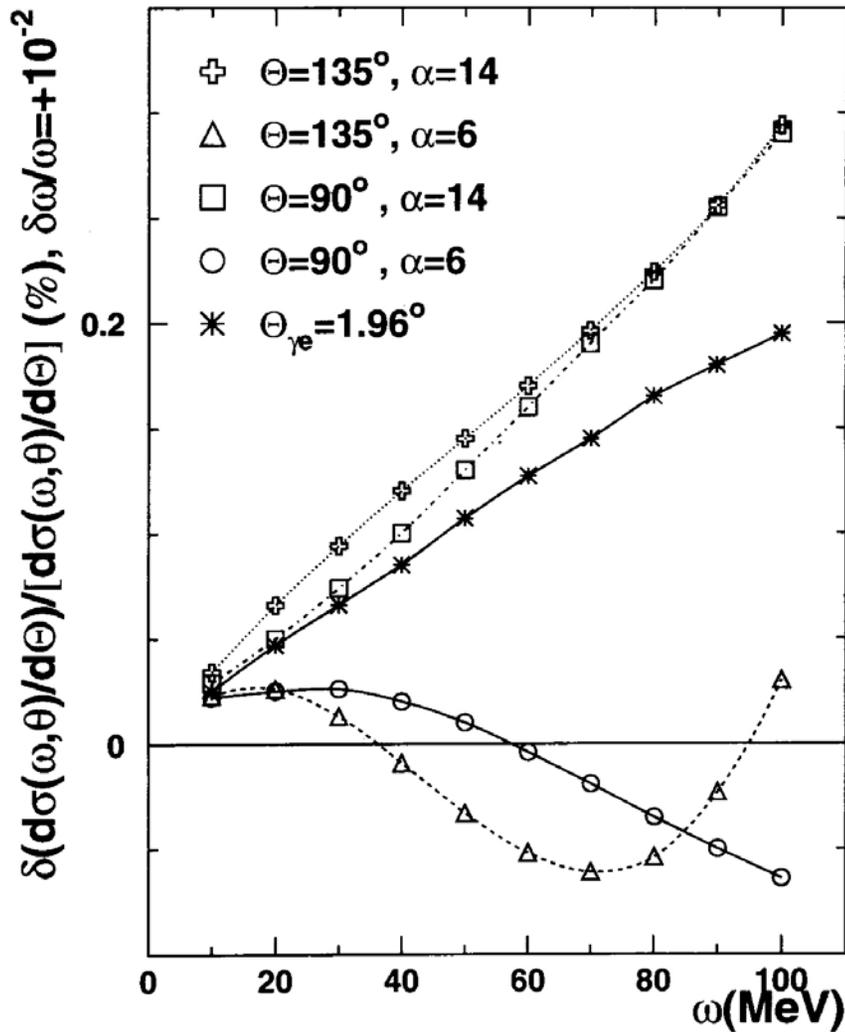




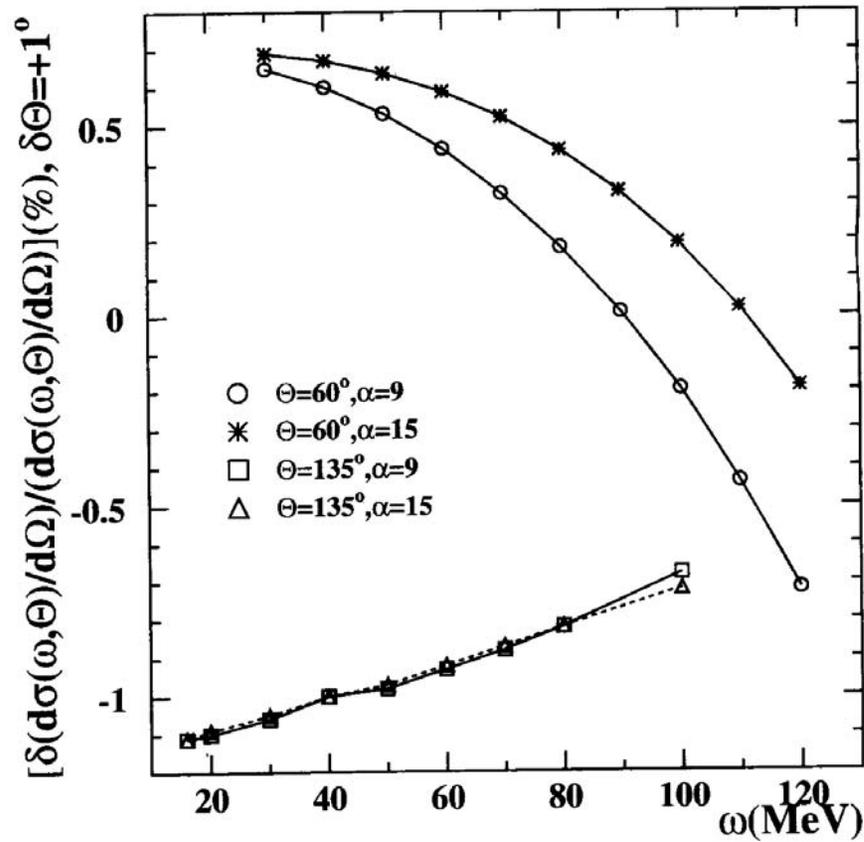
Статистические погрешности в определении  $\alpha$  и  $\beta$



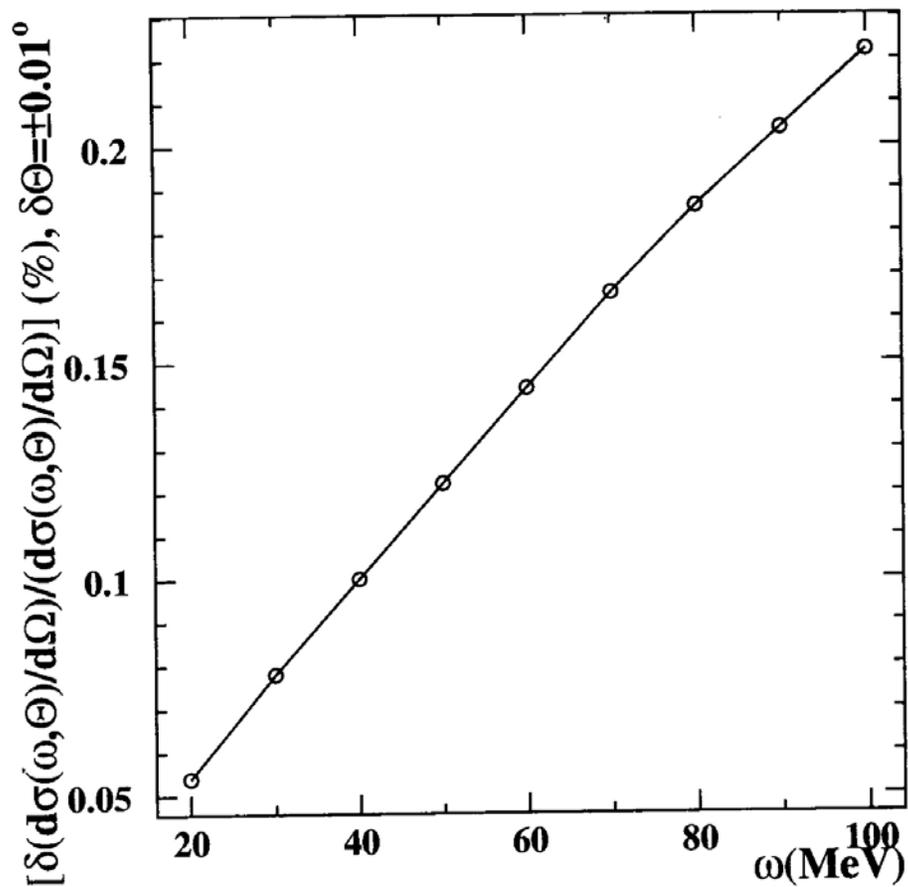
**Энергетическая зависимость телесного угла NaI детекторов (6)**



Погрешности в определении сечений, связанные с ошибкой в энергетической шкале ( $\delta\omega/\omega = 10^{-2}$ )



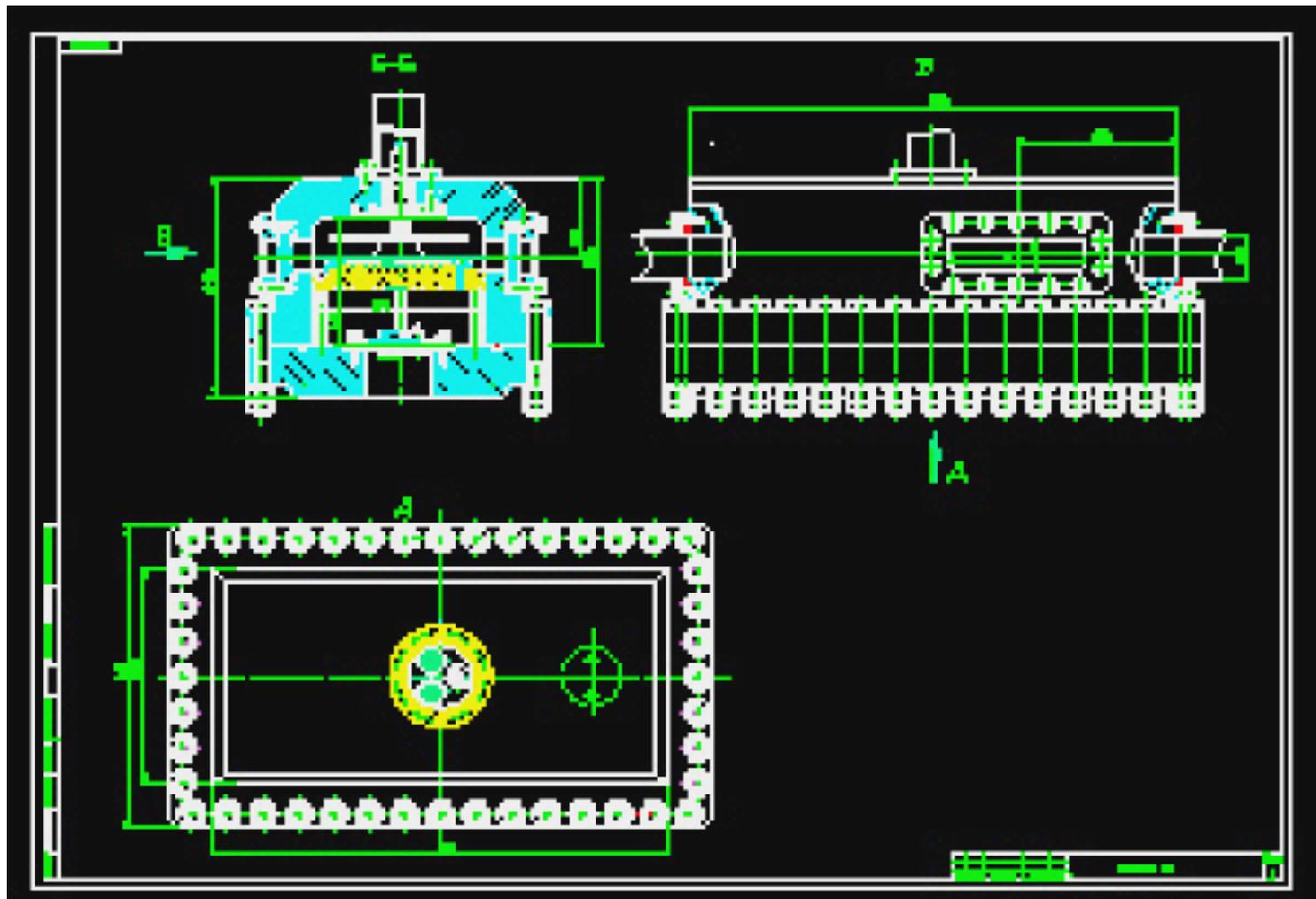
Погрешности в определении  $\gamma$ р сечений, связанные с с ошибкой в угле ( $1^\circ$ ) NaI детекторов (6)



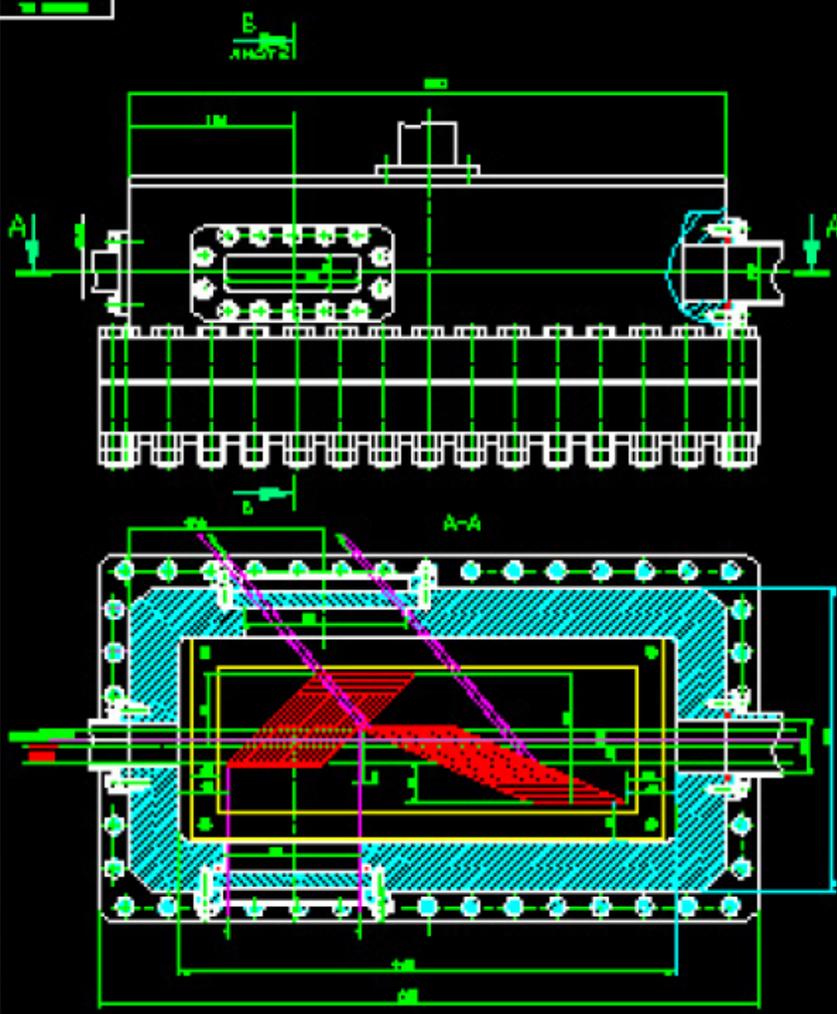
Погрешности в определении  $\gamma$  сечений, связанные с ошибкой ( $0.01^\circ$ ) в угле NaI детекторов (9)

**Не рассмотрен вопрос об изменении эффективностей  $\gamma$ -детекторов из-за включения счетчиков антисовпадений для уменьшения фона от космических лучей и исключения регистрации электронов.**





№ 1000000



Детали, материалы,  
 1. Резьба грубая 100-100/10  
 2. Резьба М-100/100

Детали, материалы

1. Резьба грубая
2. Резьба М-100/100
3. Резьба М-100/100
4. Резьба М-100/100
5. Резьба М-100/100
6. Резьба М-100/100
7. Резьба М-100/100
8. Резьба М-100/100
9. Резьба М-100/100
10. Резьба М-100/100

№	ИЗМЕНЕНИЯ	ПОЯСНЕНИЯ	ПОДПИСАНИЕ
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

## COUNTING RATE INCREASE WITH THE NEW IC CHAMBER

	NEW IC	OLD IC	COUNTING RATE INCREASE
Target length	90 mm	60 mm	1.5
Target width	30 mm	20 mm	1.5
Target height	15 mm	10 mm	1.5

	NEW NaI-IC geometry	OLD NaI-IC geometry	COUNTING RATE INCREASE
IC to NaI distance	60 cm	110 cm	3.3
Horizontal Be window size	15 cm	10 cm	
Vertical Be window size	34 mm	20 mm	

**TOTAL COUNTING RATE INCREASE ~ 10**

**Увеличение толщины  $\gamma$ -радиатора – увеличение интенсивности  $\gamma$ -пучка**

## BEAM TIME ESTIMATION

### Minimum scenario:

$I_e = 3 \mu\text{A}$ ,  $E_e = 60 \text{ MeV}$ ,  $T = 500 \text{ h}$  (3 weeks)

$N_{yp} = 50\,000$  events,  $\Delta\alpha \sim 0.8$ ,  $\Delta\beta \sim 1.0$  ( $10^{-4} \text{ fm}^3$ )

### Maximum scenario:

$I_e = 10 \mu\text{A}$ ,  $E_e = 100 \text{ MeV}$ ,  $T = 1000 \text{ h}$  (6 weeks)

$N_{yp} = 1\,000\,000$  events,  $\Delta\alpha \sim 0.2$ ,  $\Delta\beta \sim 0.3$  ( $10^{-4} \text{ fm}^3$ )

Идеальным ускорителем для проведения измерений был бы ускоритель в Майнце...

Новый директор ТУД проф. Norbert Pietralla:

**Эксперименты в ТУД могут быть продолжены при условии поставки в ТУД новой ионизационной камеры в середине 2010 г.**

**Наиболее важными будут измерения на дейтерии – определение поляризуемости нейтрона.**

