

Экспериментальное исследование ядерных реакций синтеза в системе рт. Предварительные результаты.

Д.Л. Демин (Коллаборация Тритон)

Методом мюонного катализа изучалось явление рт-синтеза в мюонной молекуле рт. Эксперимент был проведен на Фазотроне ЛЯП в 2016 г.

Целью исследования было измерение выходов продуктов реакции синтеза в рт-молекулах: γ -квантов, конверсионных мюонов и e^+e^- пар.

В предварительном анализе временных и энергетических экспериментальных спектров, определены выходы продуктов рт-синтеза (гамма-кванты и мюоны конверсии), а также соответствующие скорости ядерных реакций.

Проведено сравнение предварительных результатов настоящего исследования с результатами, полученными в PSI в конце 80-х годов.

Мюонный катализ реакций ядерного синтеза

Высокая вероятность синтеза ядер изотопов водорода в мюонных молекулах была теоретически предсказана Ч. Франком и А.Д. Сахаровым в конце **1940-х** и позднее экспериментально подтверждена в эксперименте Л. Альвареса (**1957г.**). Первые строгие научные представления о сложной цепочке реакций, вызываемых мюоном в среде изотопов водорода **H/D/T** (явление мюонного катализа), сложились в работах Д. Джексона, Я.Б. Зельдовича и С.С. Герштейна к началу **1960-х** гг.

С **1964** года в **ЛЯП ОИЯИ** по инициативе В.П. Джелепова начались систематические экспериментальные исследования мюонного катализа, результаты которых по праву относятся к фундаментальным достижениям физики:

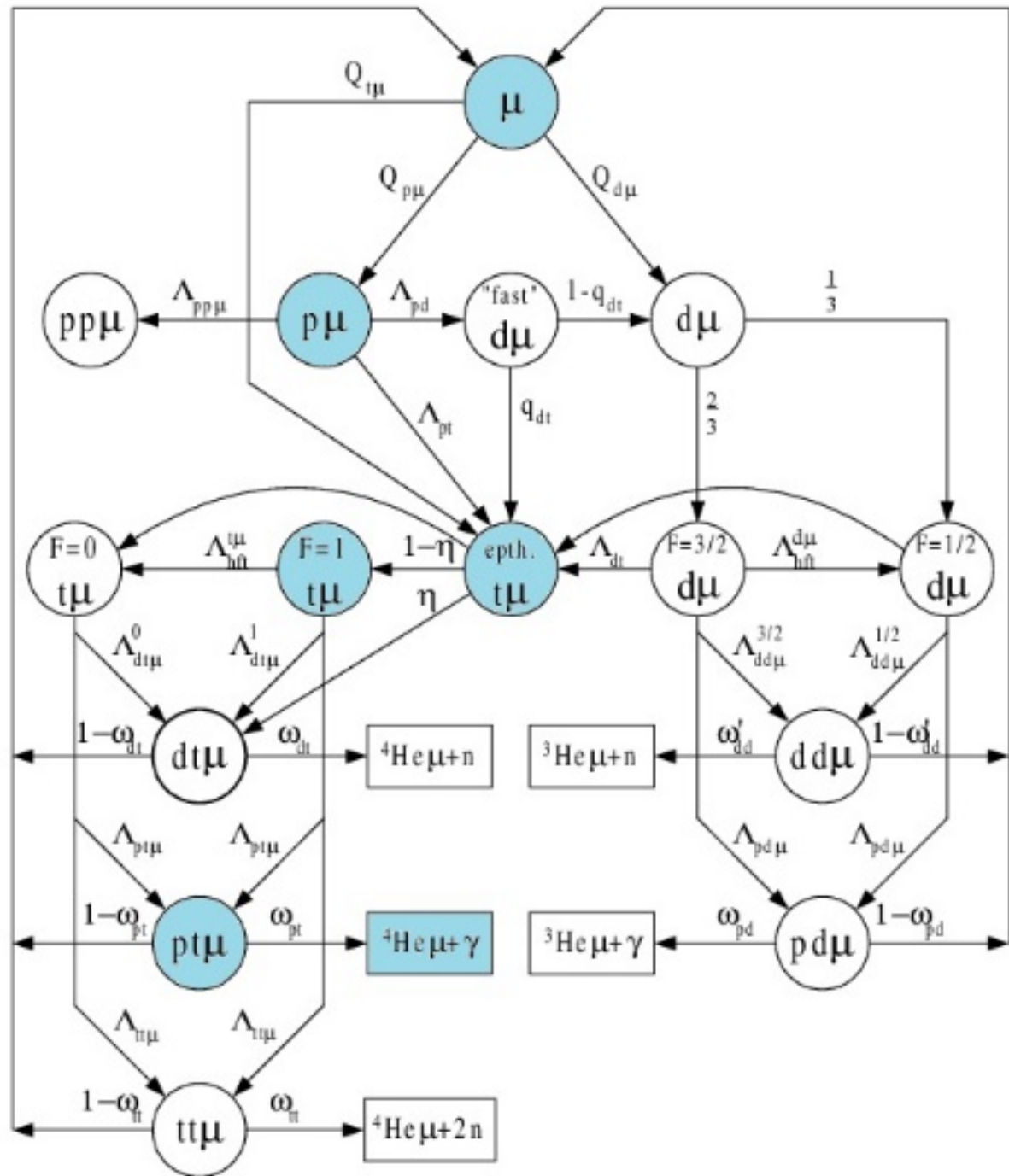
- открыто явление резонансного образования мезомолекул дейтерия;
- впервые экспериментально подтверждена предсказанная в ОИЯИ Л.И. Пономаревым и теоретиками его группы высокая скорость цикла мюонного катализа в D/T смеси дейтерия и трития;
- впервые получены спиновая и температурная зависимости скоростей образования мезомолекул в жидком и твердом дейтерии.

Эти результаты стимулировали исследования по мюонному катализу на протяжении десятилетий как в отечественных научно-исследовательских центрах (ОИЯИ, ПИЯФ), так и за рубежом (Великобритания, Канада, США, **Швейцария**, Япония).

Процессы мю-катализа

Лауреат Нобелевской премии
В.Л. Гинзбург
о мюонном катализе
в знаменитом списке
проблем физики:

«мюонный катализ
очень изящен
(и, как я считаю,
должен освещаться в
Курсе общей физики),
но представляется
нереальным
источником энергии,
по крайней мере, без
комбинации с
делением урана».



Экспериментальное наблюдение реакции $p+t$

Лос-Аламосская Национальная Лаборатория (США)

1949 год - $p + t = {}^3\text{He} + n$

A Study of the Interaction of Protons with Tritium

Taschek, R. F.; Jarvis, G. A.; Hemmendinger, A.; Everhart, G. G.; Gittings, H.
Physical Review, vol. 75, Issue 9, pp. 1361-1365.

1950 год - $p + t = {}^4\text{He} + \gamma$

Properties of the $T^3(p,\gamma)He^4$ Reaction

Argo, H. V.; Gittings, H. T.; Hemmendinger, A.; Jarvis, G. A.; Taschek, R. F.
Physical Review, vol. 78, Issue 6, pp. 691-694.

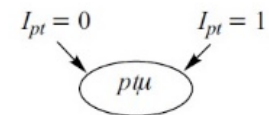
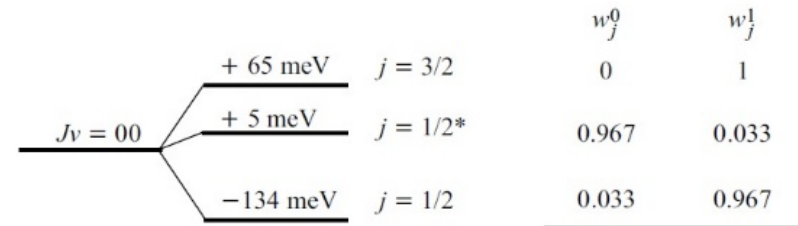
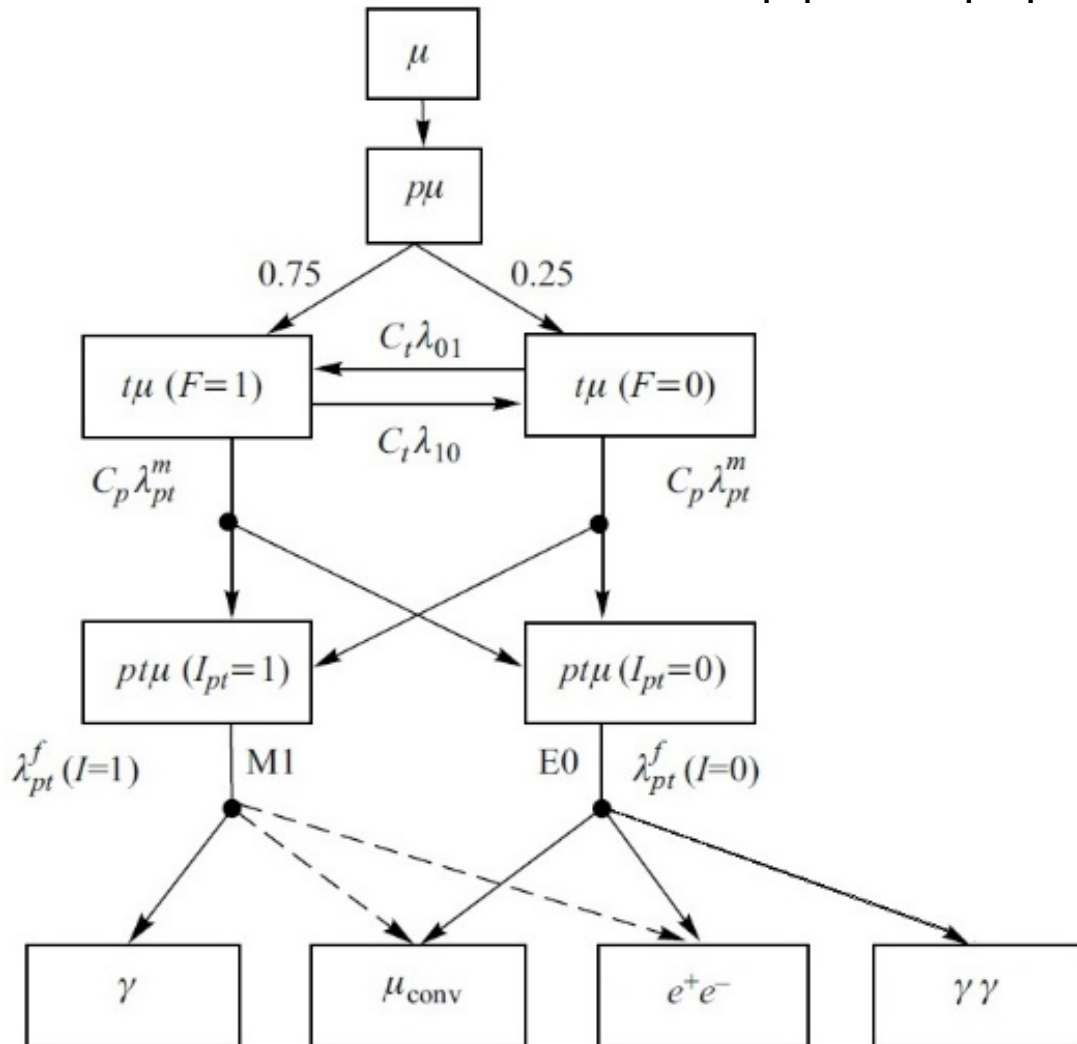
МЮ-катализ в системе $p\mu$

$$p\mu = {}^4\text{He}\mu + \gamma + 19,82 \text{ МэВ} \quad (E_\gamma = 19,77 \text{ МэВ}), \quad (1)$$

$$p\mu = {}^4\text{He} + \mu + 19,81 \text{ МэВ} \quad (E_\mu = 19,22 \text{ МэВ}), \quad (2)$$

$$p\mu = {}^4\text{He}\mu + e^+ + e^- + 18,79 \text{ МэВ}, \quad (3)$$

$$p\mu = {}^4\text{He}\mu + \gamma + \gamma + 19,82 \text{ МэВ}. \quad (4)$$



$$p\mu \rightarrow {}^4\text{He} + \mu + \gamma \quad (I_{pt} = 1)$$

$${}^3S_1 \rightarrow {}^1S_0 \text{ (M1)}$$

$$p\mu \rightarrow {}^4\text{He} + \mu_{\text{conv}}$$

$$p\mu \rightarrow \mu + {}^4\text{He} + e^+ + e^- \quad (I_{pt} = 0)$$

$${}^1S_0 \rightarrow {}^1S_0 \text{ (E0)}$$

Hyperfine structure of $p\mu$ ground state

Scheme of the MC processes in H/T mixture

Реакции ядерного синтеза

В **1932** году Кокрофт и Уолтон под руководством лорда Резерфорда открыли первую реакцию синтеза при бомбардировке лития протонами в Кавендишской лаборатории в Кембридже (Англия), и до конца тридцатых годов подавляющее число реакций синтеза легких ядер было открыто.

Одновременно и бурно развивалась теория нового явления ядерного синтеза, основные идеи предложили Вейцзеккер, Бете, Ферми, Гамов и Теллер. Теорией **E0**-перехода, важного для реакций ядерного синтеза, занимались Гёпперт-Майер, Юкава и Томас.

После открытия Фоулером ядерной реакции с **E0**-переходом в ядре фтора под действием протонного пучка Оппенгеймер теоретически объяснил наблюдаемый выход электрон-позитронных пар и пар гамма-квантов. [Oppenheimer, J.R. and Schwinger, J.S., *Physical Review* 56 (**1939**) 1066]. Оппенгеймер считал, это теоретическое достижение наиболее важным своим достижением в физике, имея, тем не менее, в своем активе теоретические работы по сжатию нейтронных звезд, за которые был неоднократно номинирован на Нобелевскую премию.

Muon-Catalyzed pt Fusion

Hyperfine Interactions 82 (1993) 259–269

The PSI experiments on muon-catalyzed pt fusion

F.J. Hartmann, P. Baumann, H. Daniel, T. von Egidy, S. Grunewald,
R. Lipowsky, E. Moser, W. Schott

*Physik-Department, Technische Universität München,
D-85747 Garching, Germany*

P. Ackerbauer, W.H. Breunlich, M. Fuchs, M. Jeitler, P. Kammel,
J. Marton, N. Nägele, J. Werner, J. Zmeskal

*Österreichische Akademie der Wissenschaften, Institut für Mittelenergiephysik,
A-1090 Vienna, Austria*

H. Bossy, K.M. Crowe

Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA

R.H. Sherman

Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87545, USA

K. Lou, C. Petitjean

Paul Scherrer Institut, CH-5232 Villigen, Switzerland

and

V.E. Markushin

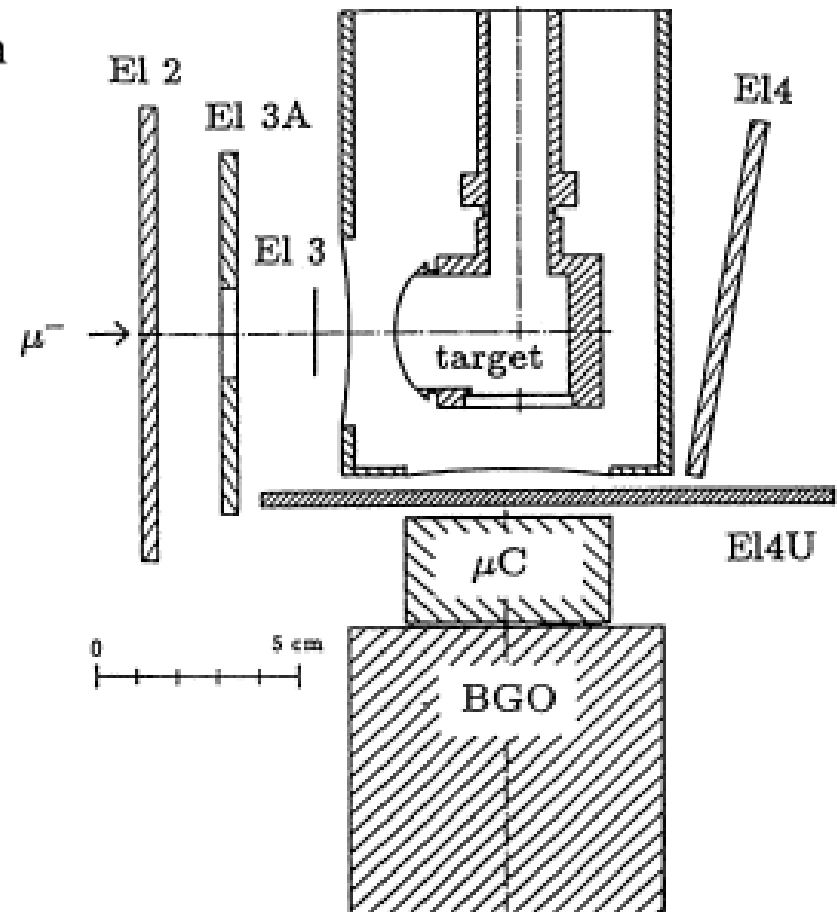
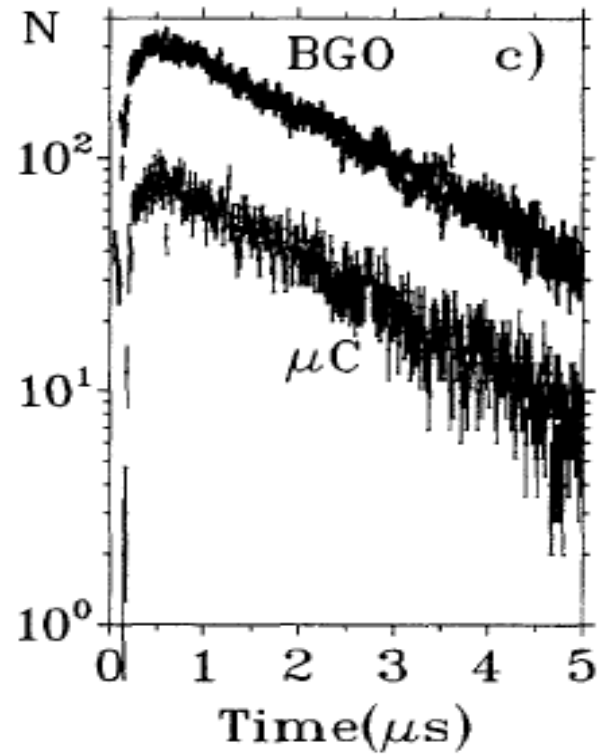
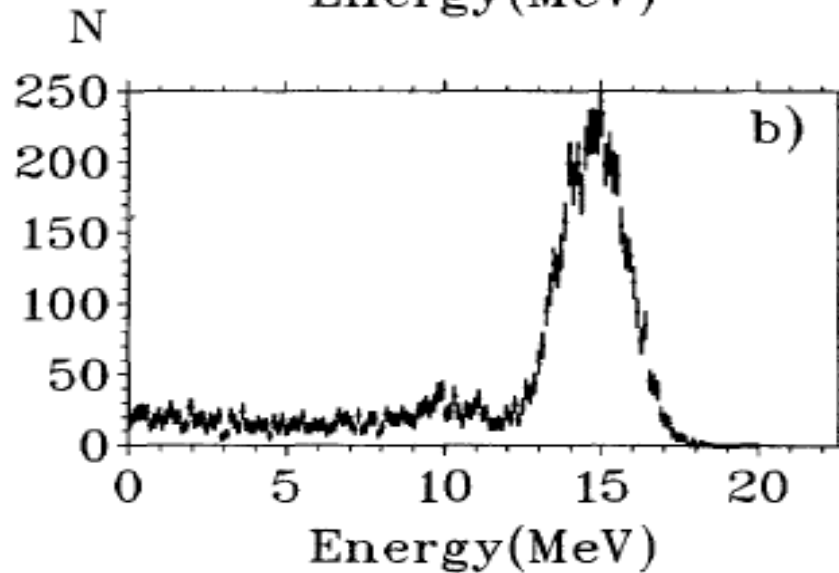
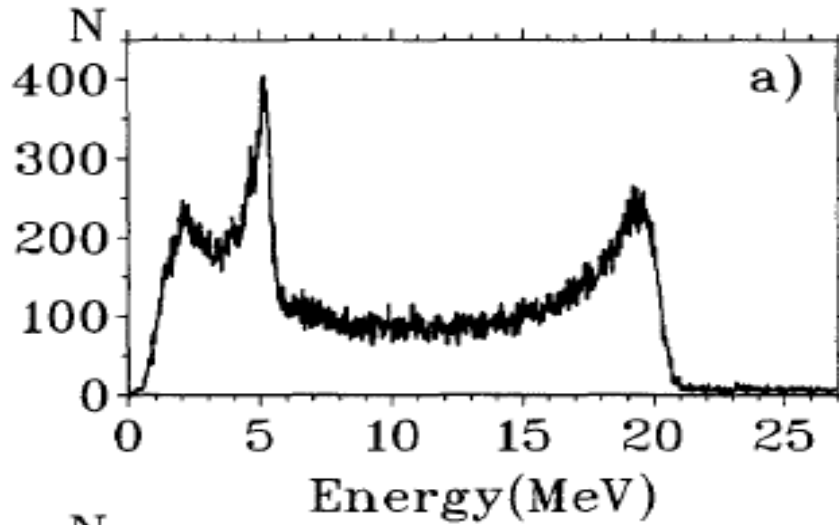


Table 2. Preliminary results. Y^μ denotes the yield for muon emission, Y^γ the gamma-ray yield. The ratio Y^μ/Y^γ is normalized to the best value of $(Y^\mu/Y^\gamma)_0$ observed at $c_t \cdot 10^3 = 8.1$ and $c_d \cdot 10^3 = 0.76$. For further explanations see text.

	mixture					
concentration						
$c_t \cdot 10^3$	8.1	\pm 0.6	1.16	\pm 0.06	0.45	\pm 0.08
$c_d \cdot 10^3$	0.76	\pm 0.05	0.402	\pm 0.012	0.37	\pm 0.06
build-up rate (μs^{-1})	7.18	\pm 0.44	7.11	\pm 0.36	5.51	\pm 0.30
$p\mu t$ formation rate (μs^{-1}) [5]		6.5		6.5		6.5
disappearance rate (μs^{-1})	0.493	\pm 0.004	0.518	\pm 0.005	0.530	\pm 0.006
fusion rate (γ) (μs^{-1}) [1]	0.06	\pm 0.01	0.06	\pm 0.01	0.06	\pm 0.01
μ decay rate (μs^{-1})		0.455		0.455		0.455
$\frac{Y^\mu/Y^\gamma}{(Y^\mu/Y^\gamma)_0}$	1.00	\pm 0.02	1.20	\pm 0.03	1.38	\pm 0.04

$$p\mu = {}^4\text{He}\mu + \gamma + 19,82 \text{ MэВ} \quad (E_\gamma = 19,77 \text{ MэВ}), \quad (1)$$

$$p\mu = {}^4\text{He} + \mu + 19,81 \text{ MэВ} \quad (E_\mu = 19,22 \text{ MэВ}) \quad (2)$$



PSI experiment (1993)

$$\lambda_{10} = 1.06 \pm 0.13 \times 10^3 \mu\text{s}^{-1} \text{ (spin-flip rate)}$$

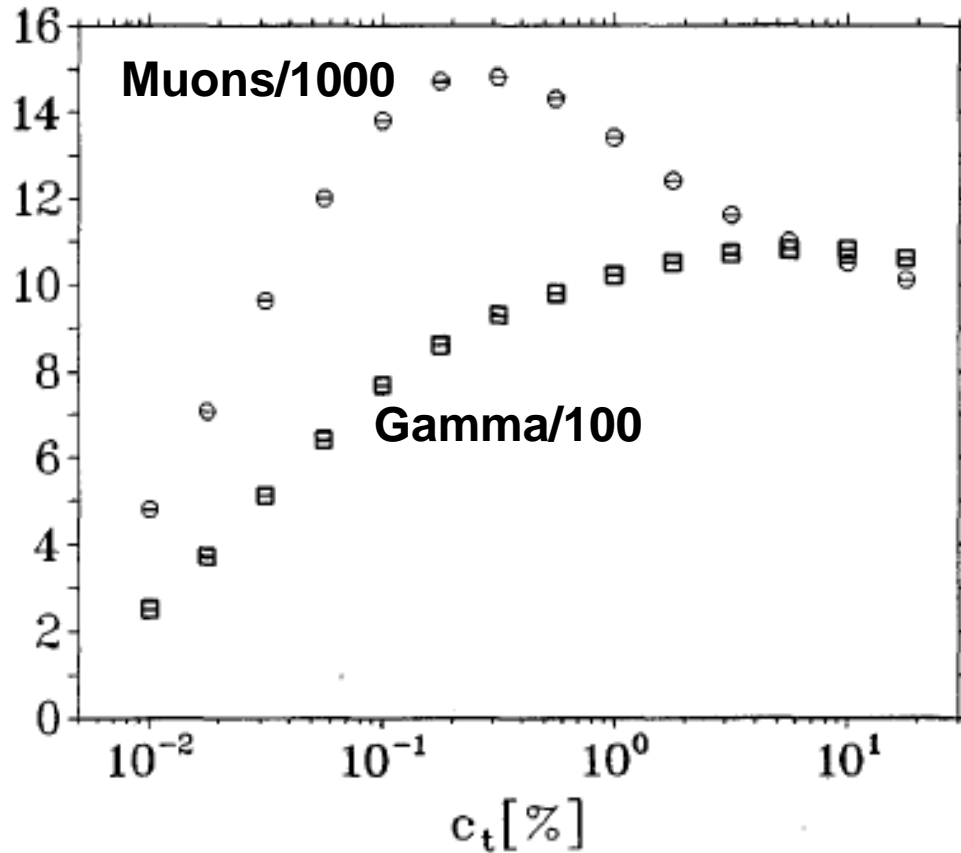
$$\lambda_{\text{pt}}^{\text{m}} = 7.5 \pm 0.03_{-0.3}^{+1.0} \mu\text{s}^{-1} \text{ (molecule formation rate)}$$

$$\lambda_{\text{pt}}^{\gamma} (I_{\text{pt}}=1) = 0.067 \pm 0.002_{-0.002}^{+0.005} \mu\text{s}^{-1} \text{ (fusion rate)}$$

$$\lambda_{\text{pt}}^{\mu} (I_{\text{pt}}=0) = 0.15 \pm 0.02 \mu\text{s}^{-1} \text{ (muon conversion rate)}$$

Role of the spin-flip process (Gershtein-Wolfenstein effect)

$$t_{\mu}(F = 1) + t \frac{c_t \lambda_{10}}{c_t \lambda_{01}} t_{\mu}(F = 0) + t'$$



Detected	Measured	Deduced
pt-fusion γ-rays	time distribution	$\lambda_{pt}^f(I=1)$ λ_{pt}^m
pt-fusion conversion μ	time distribution	$\lambda_{pt}^f(I=0)$
pt-fusion γ's, conversion μ	intensity ratio	spin flip rate λ_{10}
pt- and pd-fusion γ-rays	intensity ratio	transfer rate λ_{pt}
pd-fusion γ-rays	time distribution	$\lambda_{pd}^f(I=1)$ λ_{pd}^m
dt- (and tt-)fusion neutrons	time distribution	λ_{pt}^m
pt-fusion γ-rays	line shape	population of levels in $\mu\alpha$ after sticking in pt fusion

Комплекс ТРИТОН

Для проведения систематических исследований явления мюонного катализа ядерных реакций синтеза в среде изотопов водорода при плодотворном сотрудничестве Российского федерального ядерного центра - ВНИИЭФ и Лаборатории ядерных проблем - ОИЯИ был создан экспериментальный комплекс ТРИТОН. Со стороны ВНИИЭФ руководителем работ по созданию комплекса был А.А. Юхимчук, со стороны ОИЯИ - В.Г. Зинов.

Начиная с **1996** года, с применением комплекса ТРИТОН на Фазотроне в Дубне проведены всесторонние исследования параметров мюонного катализа в смесях **D/T** и **H/D/T (около 100 различных концентраций)**, в чистом тритии T_2 измерены **n-n** и **α -n** корреляций в реакции **$t + t \rightarrow {}^4\text{He} + n + n$ (2003)**, вероятность радиационного канала в реакции **$d+d \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$ (2008)**. Результаты этих работ опубликованы в ведущих российских научных журналах, а комплекс ТРИТОН удостоен Первой премии ОИЯИ.

Experimental study of nuclear fusion reactions in a $p\mu$ system

Experiment TRITON (Theme 1101), stage – data analysis.

D.L. Demin, V.N. Duginov, K.I. Gritsaj, A.D. Konin, T.N. Mamedov, A.I. Rudenko,
V.P. Volnykh (*Dubna*),

A. Adamczak (*Krakow*), L.N. Bogdanova, M.P. Faifman (*Moscow*),

V. Wagner (*Rez*), V.V. Baluev, A.M. Demin, I.P. Maksimkin, A.A. Yukhimchuk (*Sarov*).

$$p\mu = {}^4\text{He}\mu + \gamma + 19,82 \text{ MэВ}, \quad (1)$$

$$p\mu = {}^4\text{He} + \mu + 19,81 \text{ MэВ}, \quad (2)$$

$$p\mu = {}^4\text{He}\mu + e^+ + e^- + 18,79 \text{ MэВ}, \quad (3)$$

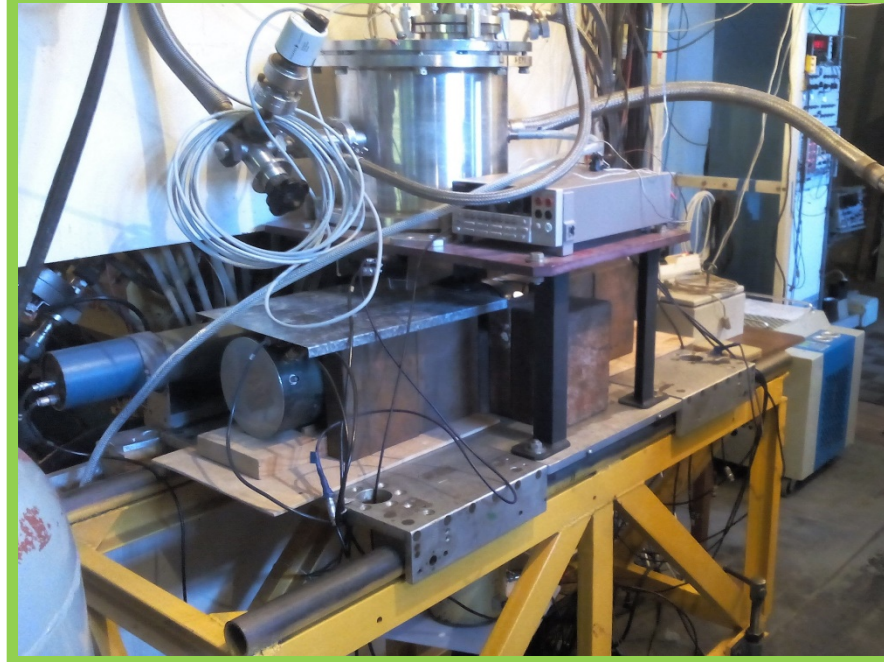
$$p\mu = {}^4\text{He}\mu + \gamma + \gamma + 19,82 \text{ MэВ}. \quad (4)$$

The 50cc cryogenic target filled with liquid H/T mixture was exposed to the negative muon beam (10^4 s^{-1} , 100 MeV/c) of JINR Phasotron in 2016.

Main run-time duration is 270 h.

The experiment is aimed at measuring the product yields of the reaction: γ -quanta, conversion muons and e^+e^- pairs.

TRITON



Подготовка 2011-2015

- Инфраструктура Фазотрона
- Криогенная мишень,
- Детекторы, DAQ,
- М.-С. моделирование,
- Проверка оборудования на пучке.

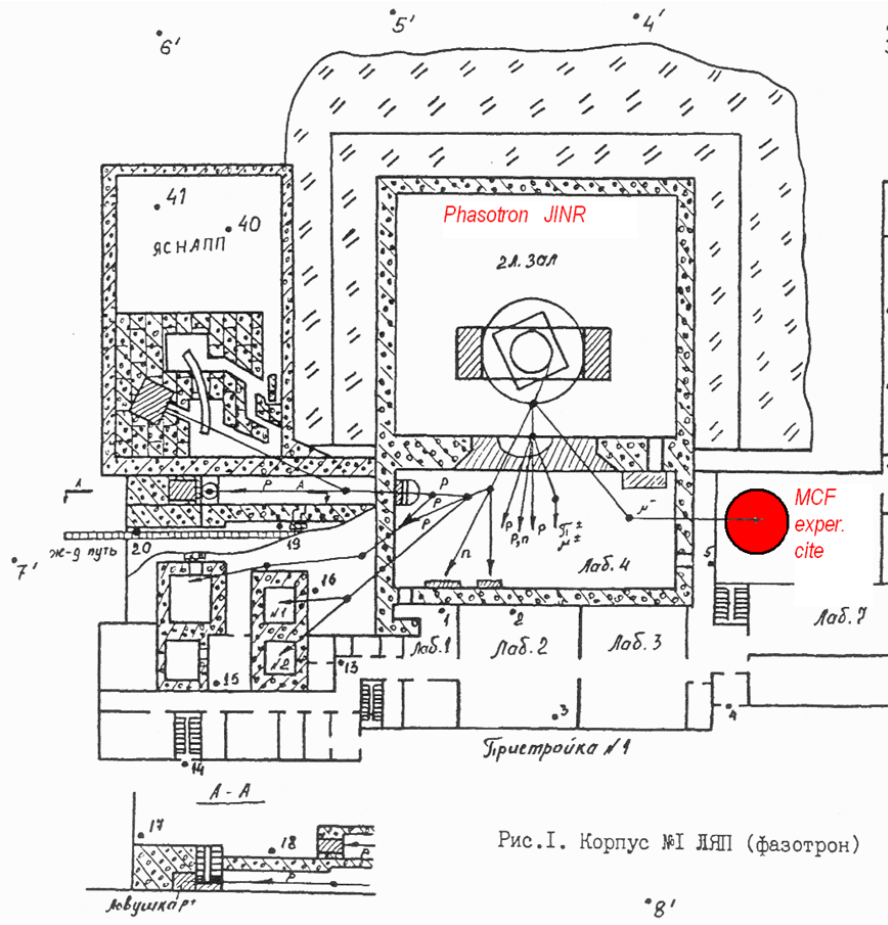


Рис.1. Корпус №1 ЛЯП (фазотрон)



Расположение установки ТРИТОН

Параметры мюонного пучка

Импульс **100 МэВ/с**,

Интенсивность **$1,4 \cdot 10^4 \mu/\text{с}$** ,

Ток протонного пучка **$0,5 \mu\text{А}$** ,

Время-пролетные диаграммы пучка мюонов

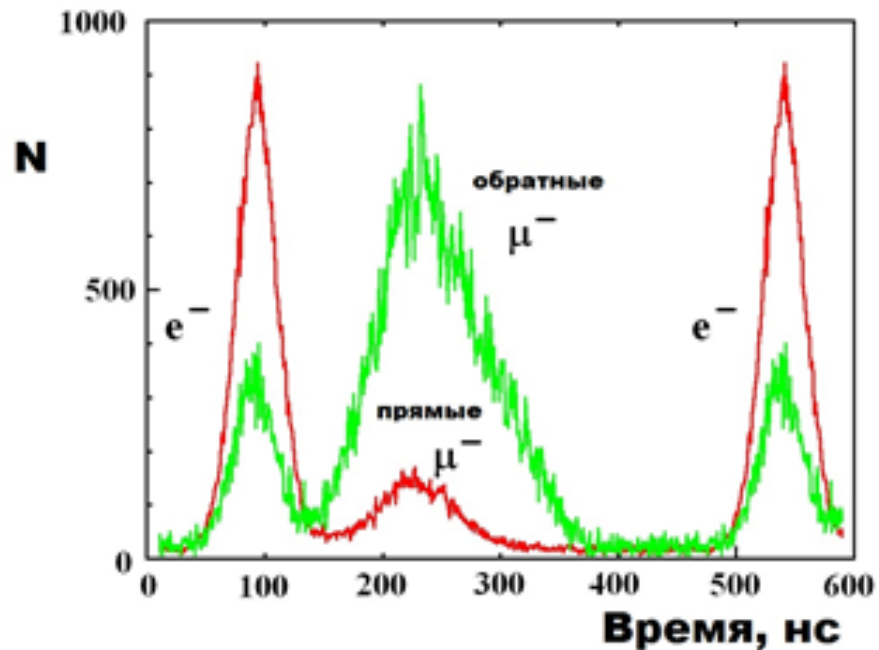
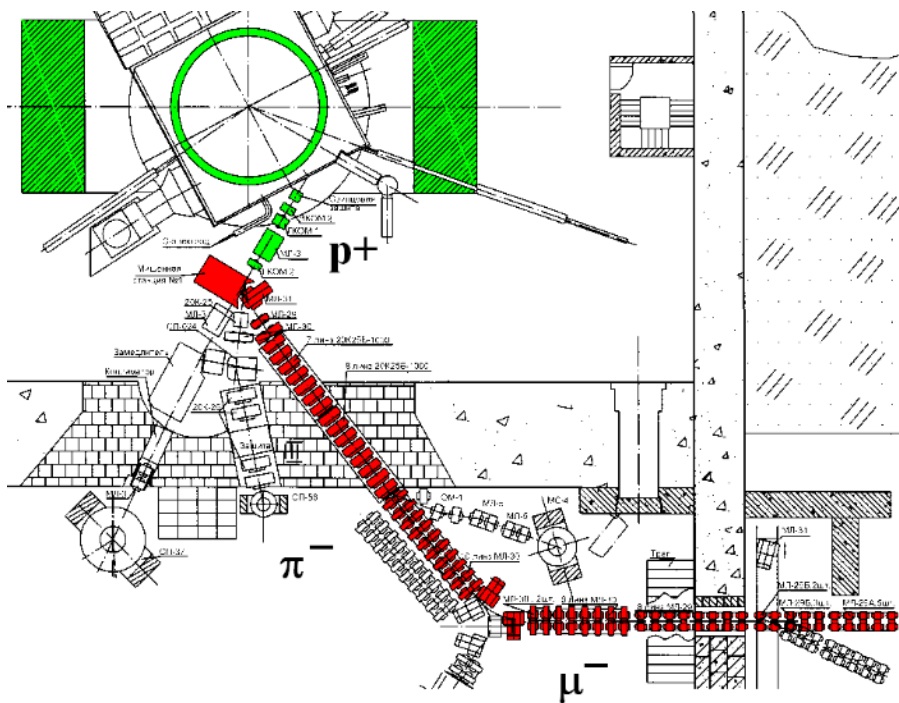


Схема экспериментальной установки:

1-3 – пластиковые счетчики,

BGO – BGO кристалл,

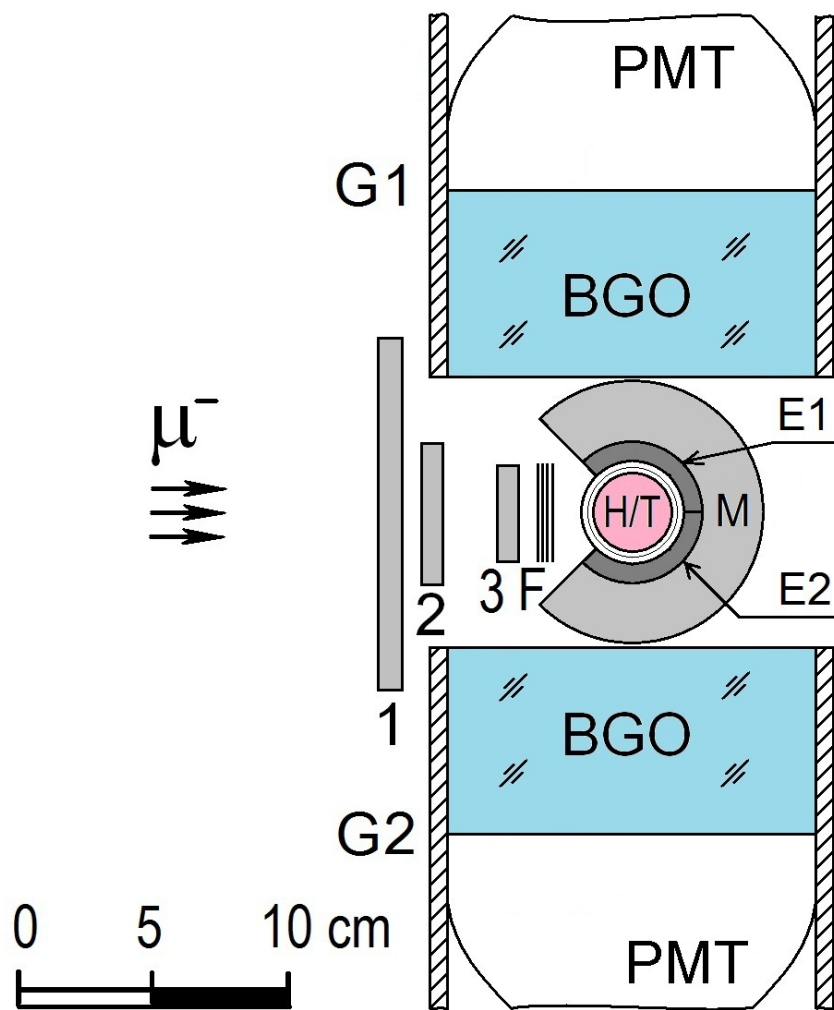
E1-E2 – электронный телескоп,

F – медный фильтр,

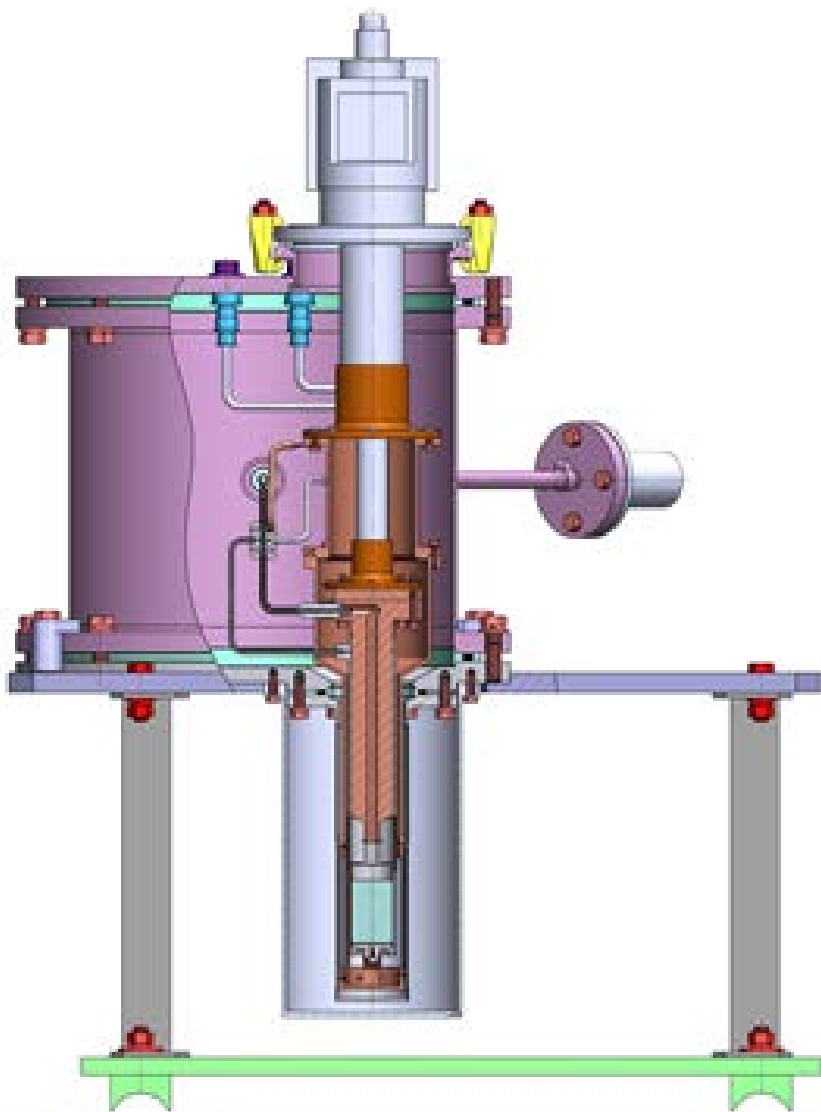
G1-G2 – гамма-спектрометр,

H/T – мишень,

M – детектор мюонов
конверсии

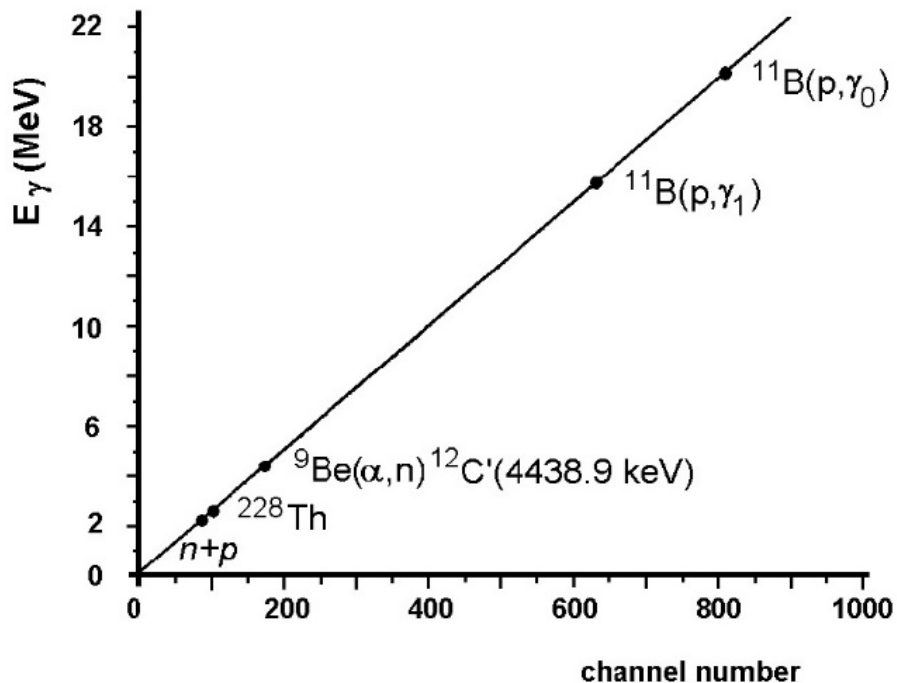


Криогенная мишень объемом 50 см.куб.



Гамма-спектрометр состоит из двух идентичных ВГО-детекторов

E15-2012-107



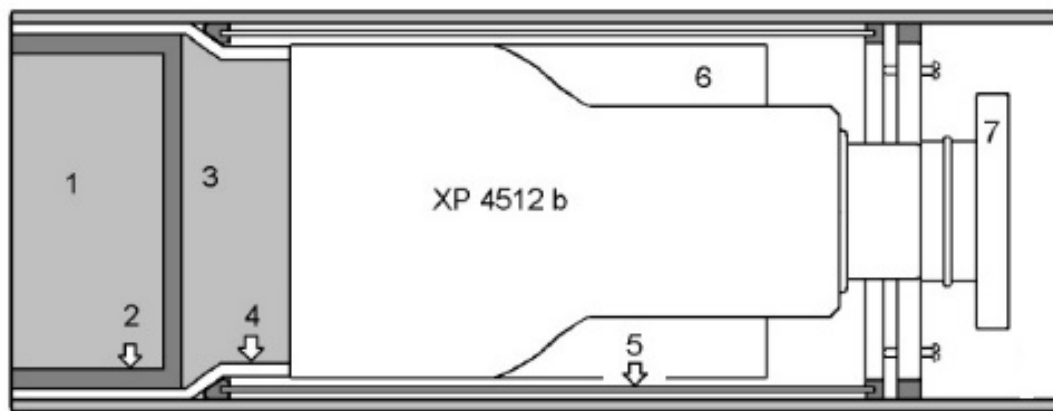
D. L. Demin ^{*}, V. V. Filchenkov, L. N. Generalov ^a,
K. I. Gritsaj, A. D. Konin, A. V. Livke ^a, A. I. Rudenko,
Yu. I. Vinogradov ^a, V. P. Volnykh

GAMMA SPECTROMETER
FOR STUDYING THE MCF REACTIONS

Submitted to *Nuclear Instruments and Methods
in Physics Research. Section A*

^a Russian Federal Nuclear Center VNIIEF, Sarov, Russia
^{*} E-mail: demin@jinr.ru

$$\Delta E_\gamma(\%) = 3.9 \times \sqrt{1 + 12/E_\gamma(\text{MeV})}$$



The gamma detector: 1 - BGO-crystal, 2 - plastic scintillator shell, 3 - light-guide, 4 - teflon, 5 - iron magnetic shield, 6 - permalloy magnetic shield, 7 - electronics



Макет электронного телескопа E1 - E2

Световод выполнен из пластиковых волокон, что позволяет обеспечить спектрометрические характеристики при компактной геометрии.

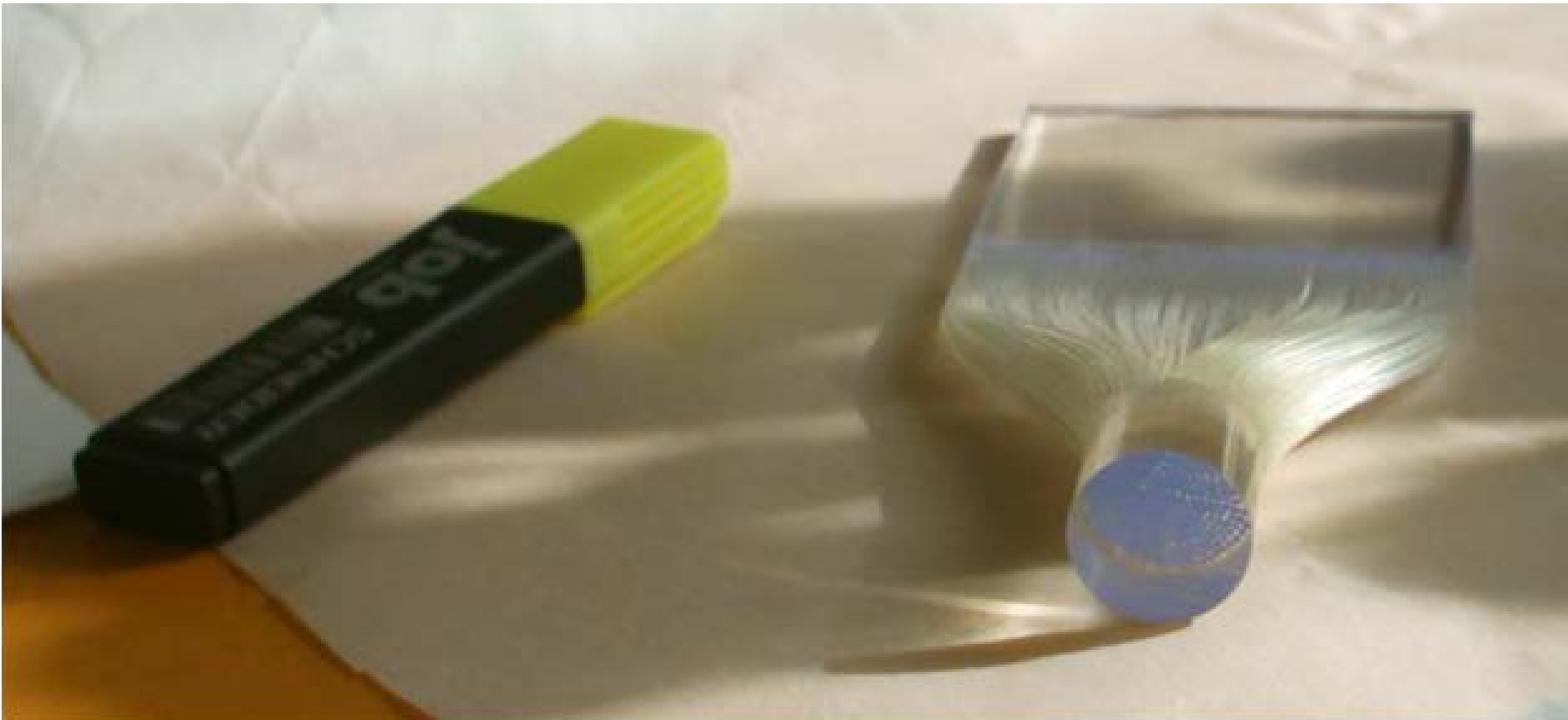
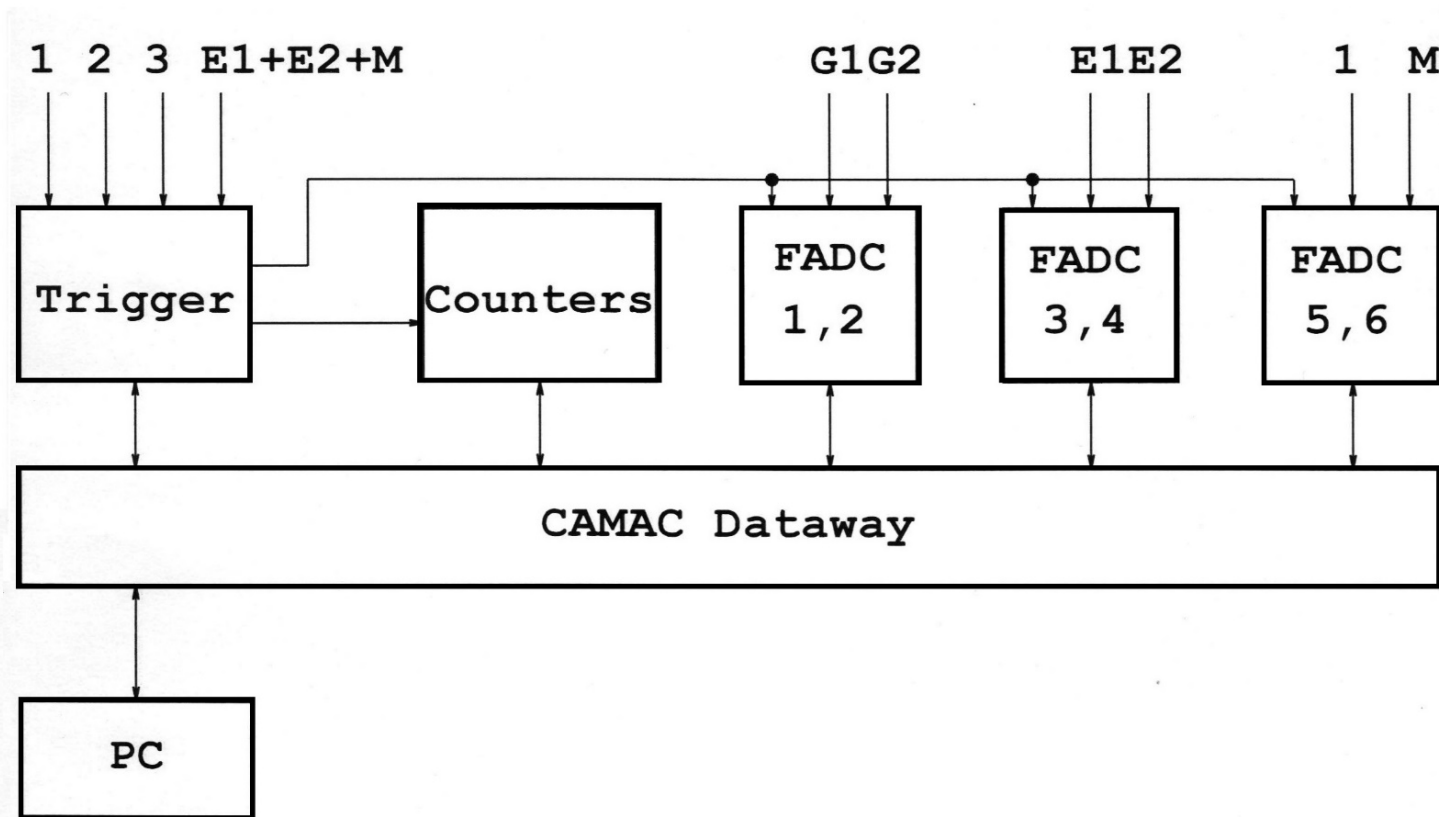
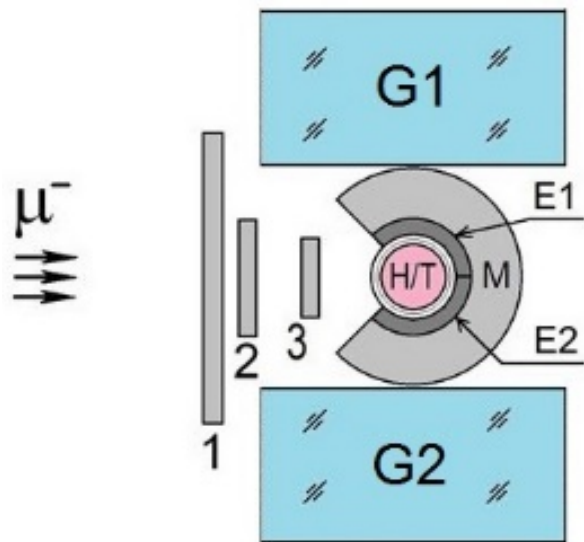
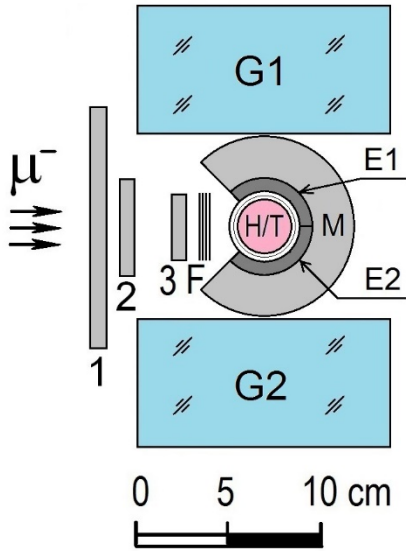


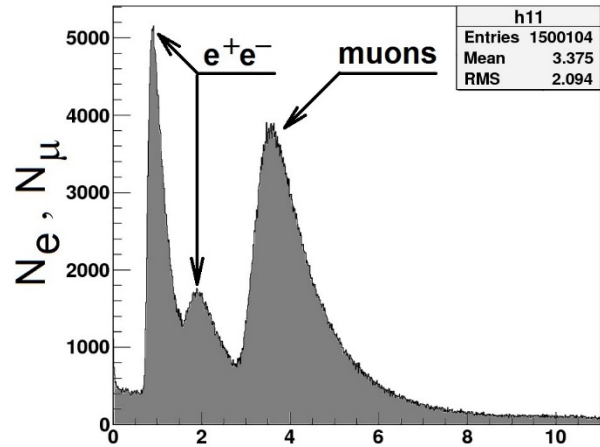
Схема электроники



Моделирование Monte-Carlo :

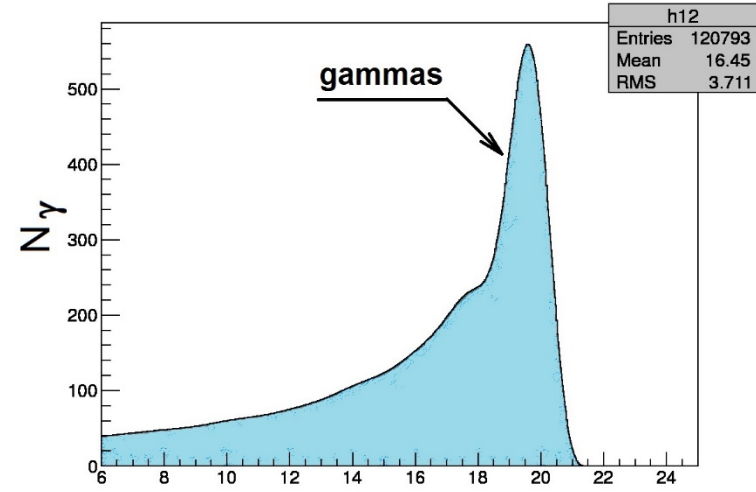


a



Energy loss in E1+E2 (MeV)

b



Energy loss in G1+G2 (MeV)

c

Particles	Registration efficiency, %
$\epsilon(\gamma)$	20
$\epsilon(\mu)$	66
$\epsilon(\text{pairs } 1)$	90
$\epsilon(\text{pairs } 2)$	16
$\epsilon(e_d1)$	70
$\epsilon(e_d2)$	30

Критерии отбора экспериментальных событий:

- e_{d1} is the coincidence signal $(E1 + E2) \cdot M$, responsible for the muon stop in the target;

- $e_{d2} = (\bar{E}1 + \bar{E}2) \cdot M \cdot (G1 + G2)$ means conversion muon decay in detector M.

Marker x notes the fusion reaction products: γ , e^-e^+ or conversion muon. The appropriate signals are the following:

- $x = \gamma$: $(\bar{E}1 + \bar{E}2) \cdot \bar{M} \cdot G$, the decay electron selected as e_{d1} ;

- $x = \mu$: the coincidence signal $(E1 + E2) \cdot M$, and e_{d2} for the electron from muon decay;

- $x = e^-e^+$: $(E1 + E2) \cdot M$, and e_{d1} corresponds to detection of at least one particle of the pair;

- $E1 \cdot E2 \cdot M$, and the subsequent e_{d1} corresponds to simultaneous detection of both particles of the pair with their coincidence in time.

For a more reliable identification of the registered experimental events and the background suppression, one should put certain timing limitations, usual in MC experiments:

$$t(e_{d1}) - t(\mu) > 0.5 \mu s, \quad t(e_{d1,2}) = t_x + (0.5-4.5) \mu s$$

Методика определения выхода в канале реакции

The number of detected events for each sort (y) of the fusion products is

$$N_y = N_\mu \cdot Y^0(y) \cdot \text{eff}(y),$$

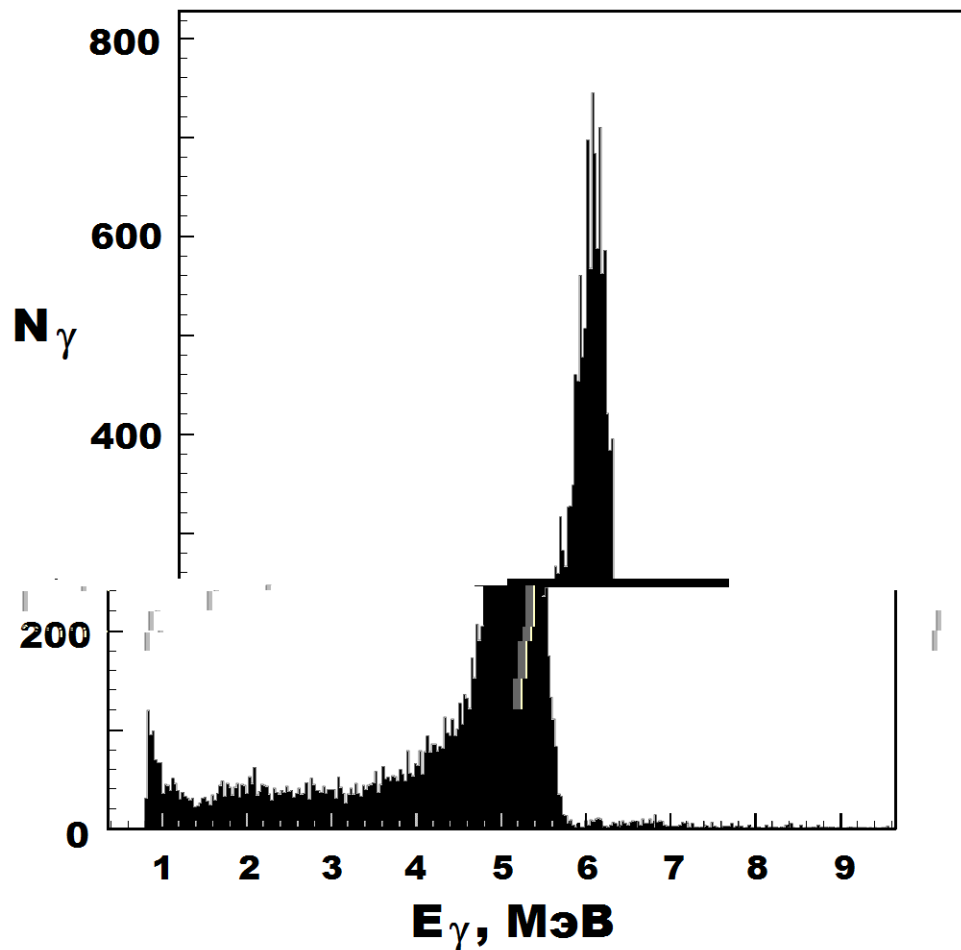
where $Y^0(y)$ is the absolute yield and $\text{eff}(y)$ are the detection efficiencies:

$$\begin{aligned} \text{eff}(\gamma) &= \epsilon(\gamma) \cdot \epsilon(e_{d1}) \cdot f_t, & \text{eff}(\mu) &= \epsilon(\mu) \cdot \epsilon(e_{d2}) \cdot f_t, \\ \text{eff}(\text{pairs } 1) &= \epsilon(\text{pairs } 1) \cdot \epsilon(e_{d1}) \cdot f_t, & \text{eff}(\text{pairs } 2) &= \epsilon(\text{pairs } 2) \cdot \epsilon(e_{d1}) \cdot f_t. \end{aligned}$$

Детальное описание методики эксперимента на стадии подготовки содержится в работе [L.N. Bogdanova, et al., "Experimental study of nuclear fusion reactions in a pтμ system", Physics of Particles and Nuclei Letters 9, No.8 (2012) 605].

2013 - проведена проверка экспериментального оборудования на мюонном пучке с мишенью, заполненной жидким водородом с природной концентрацией дейтерия

Получен
экспериментальный
энергетический спектр
гамма-квантов от
реакции



Проведение эксперимента

В период 10-16 мая и 14-24 ноября 2016 г. проведены сеансы измерений мю-катализа ядерной реакции синтеза $p+t$ на Фазотроне ЛЯП.

Длительность набора данных составила **270** часов.

Концентрация трития в жидководородной мишени была **0,8%** в майском сеансе и **0,08%** в ноябрьском сеансе.

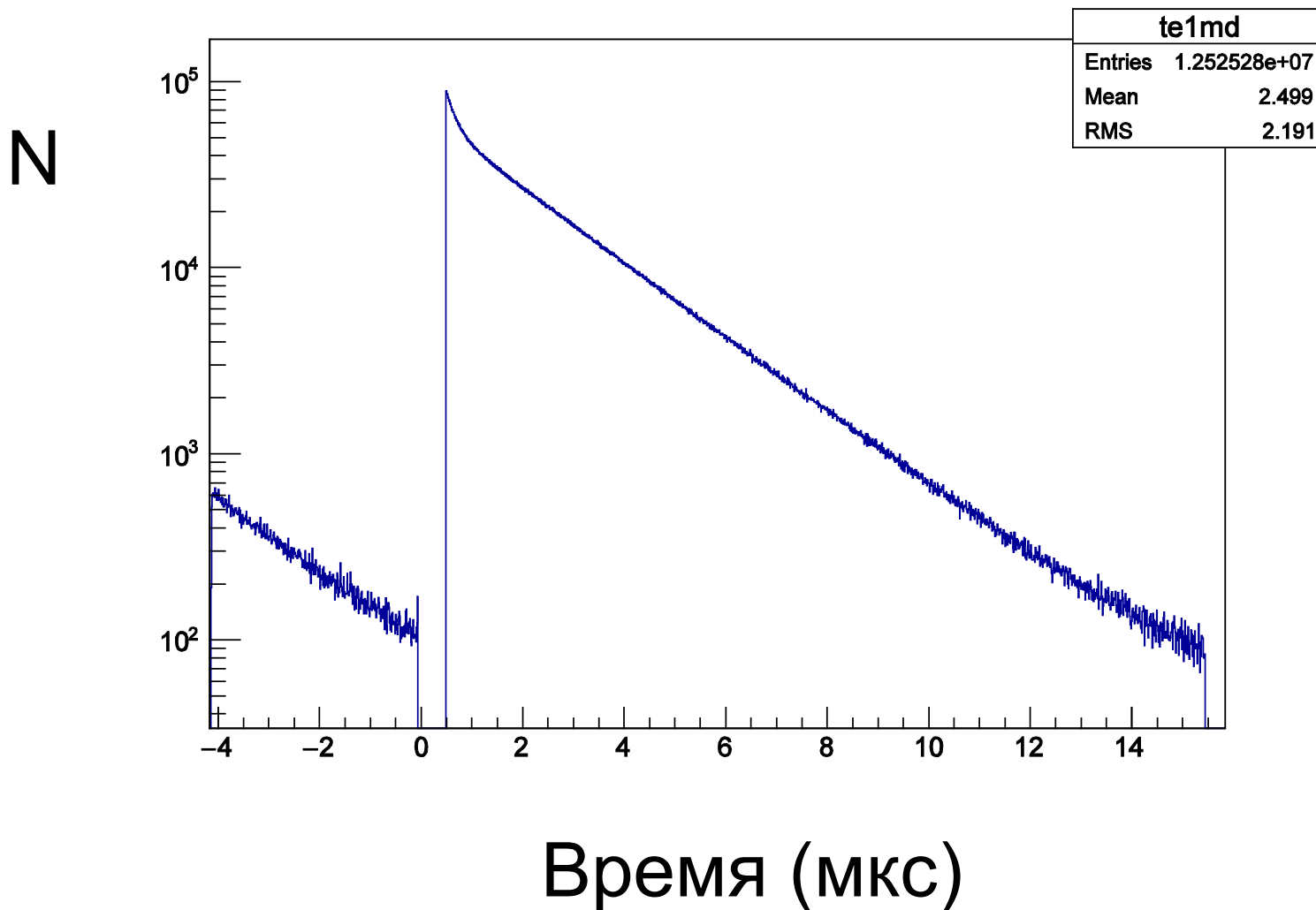
В ноябрьском сеансе были проведены две экспозиции с разной геометрией расположения гамма-детекторов относительно мишени.

Экспериментальные спектры:

Временной спектр электронов от распада мюонов в мишени

для нормировки

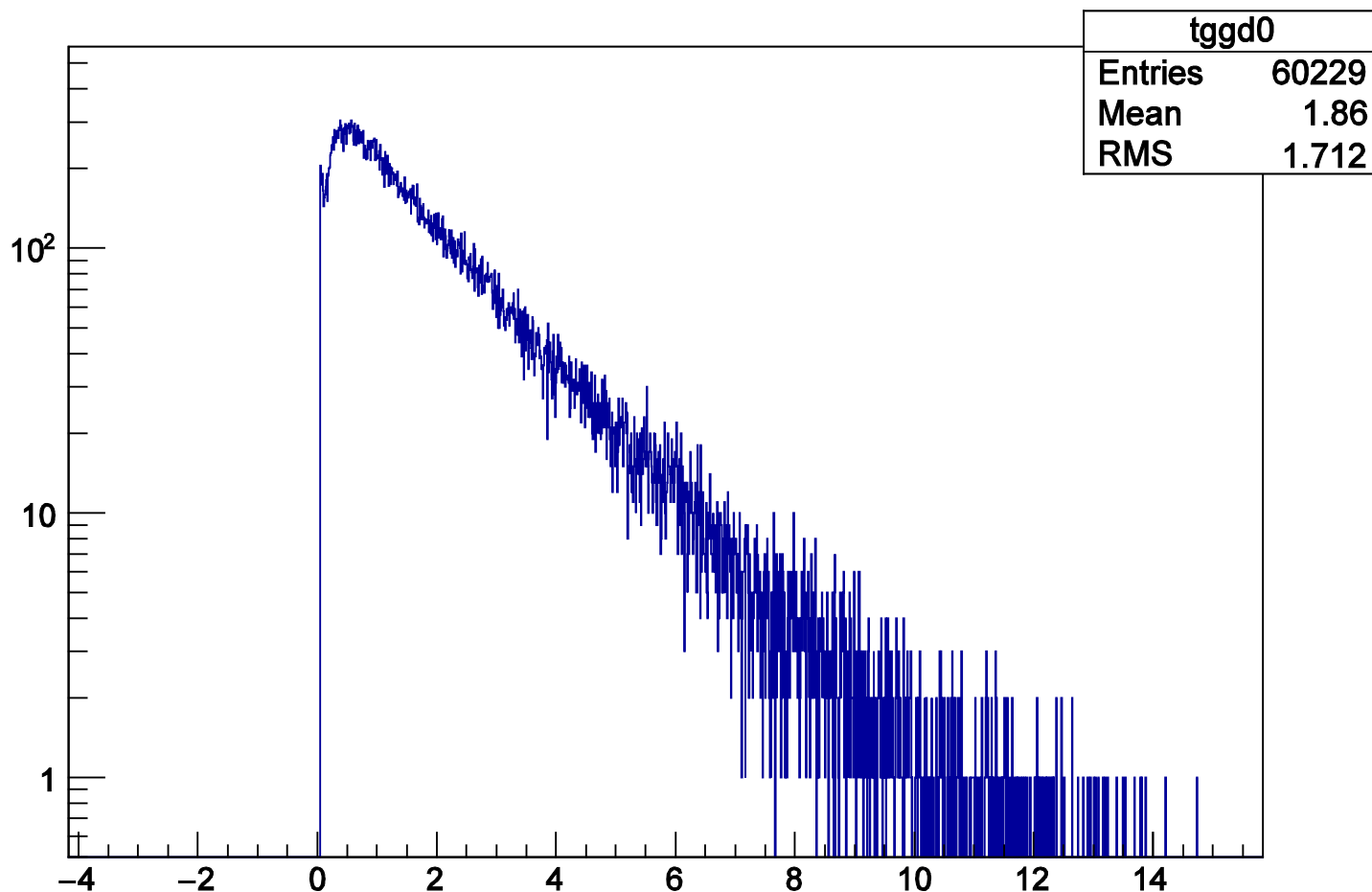
$$N_e^{\text{total}}(t) = A_e \exp(-\lambda_e t) + k B_{\text{empty}}(t) + F$$



Экспериментальные спектры:

Временной спектр гамма-квантов

N

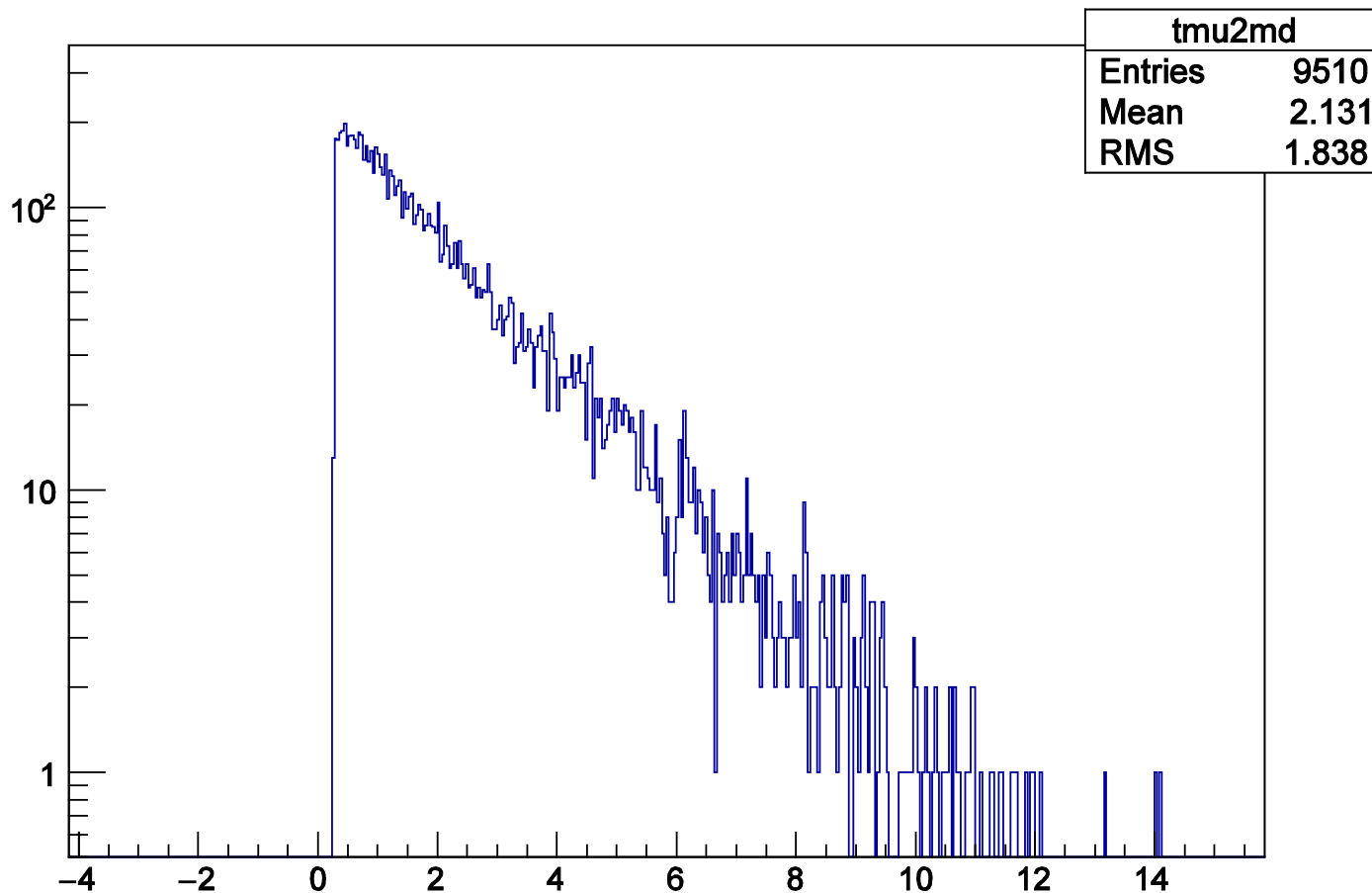


Время (мкс)

Экспериментальные спектры:

Временной спектр мюонов конверсии

N

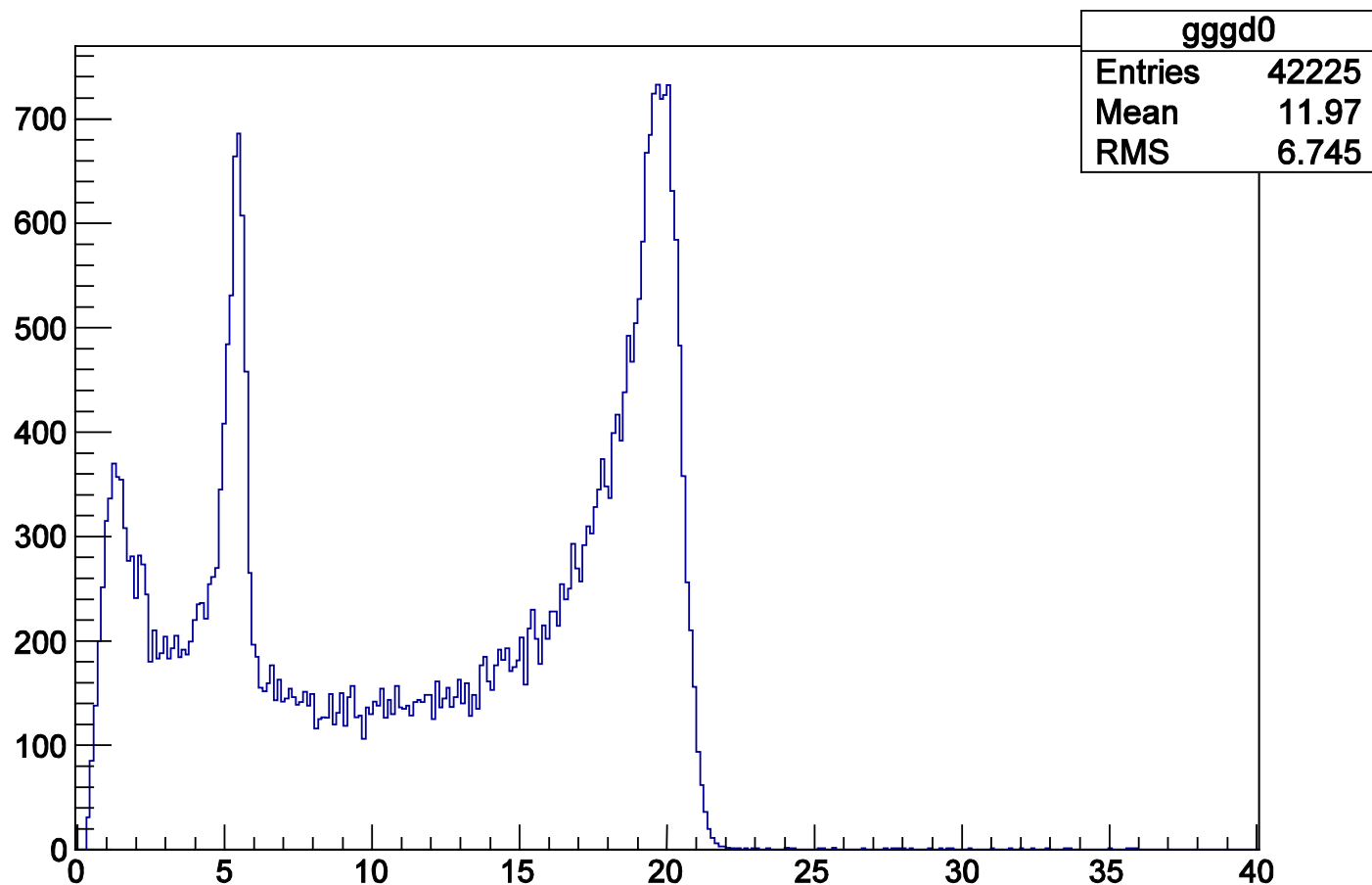


Время (мкс)

Экспериментальные спектры:

Энергетический спектр гамма-квантов $C_t=0,8$

N

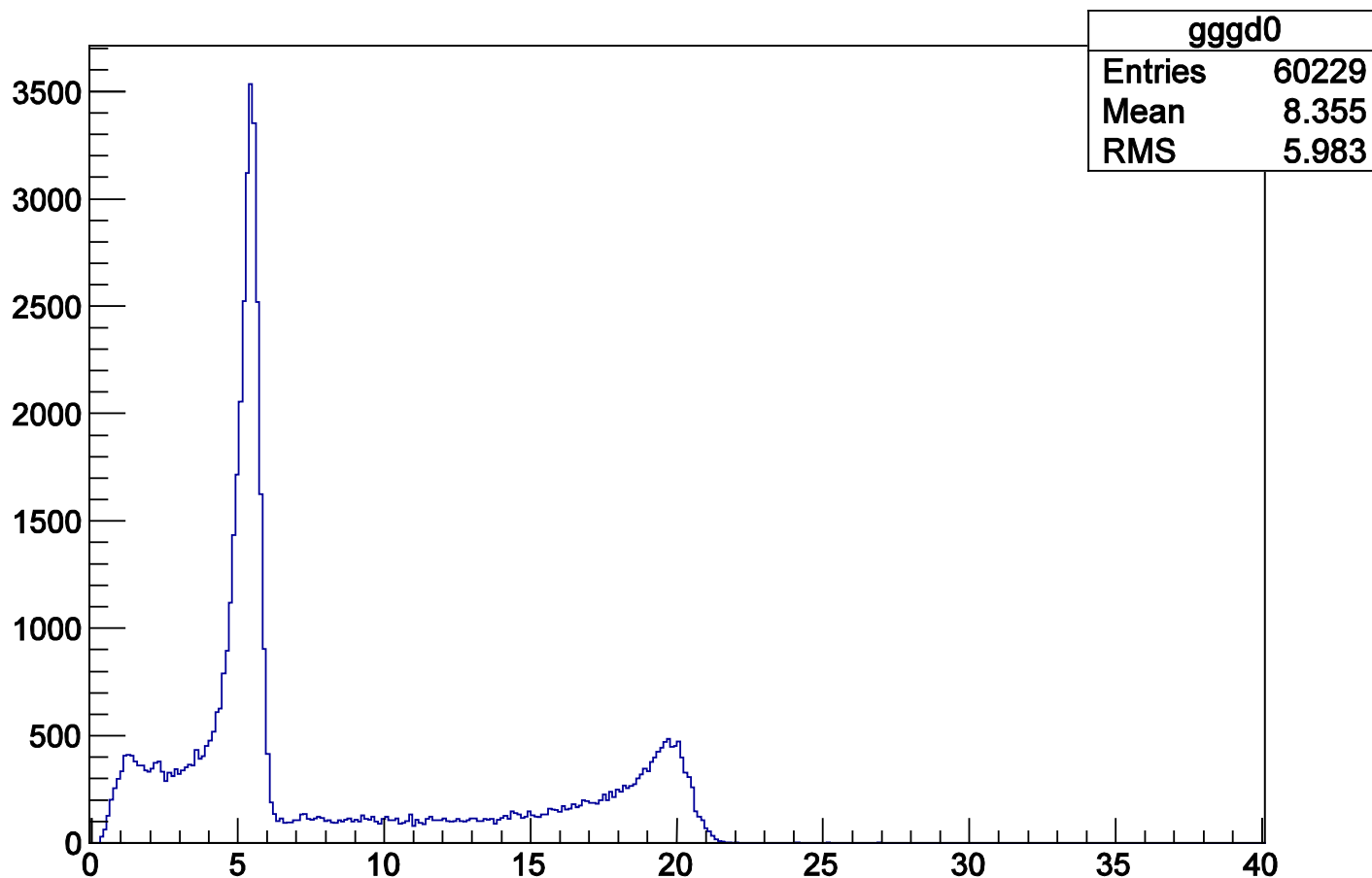


Энергия (МэВ)

Экспериментальные спектры:

Энергетический спектр гамма-квантов $C_t=0,08$

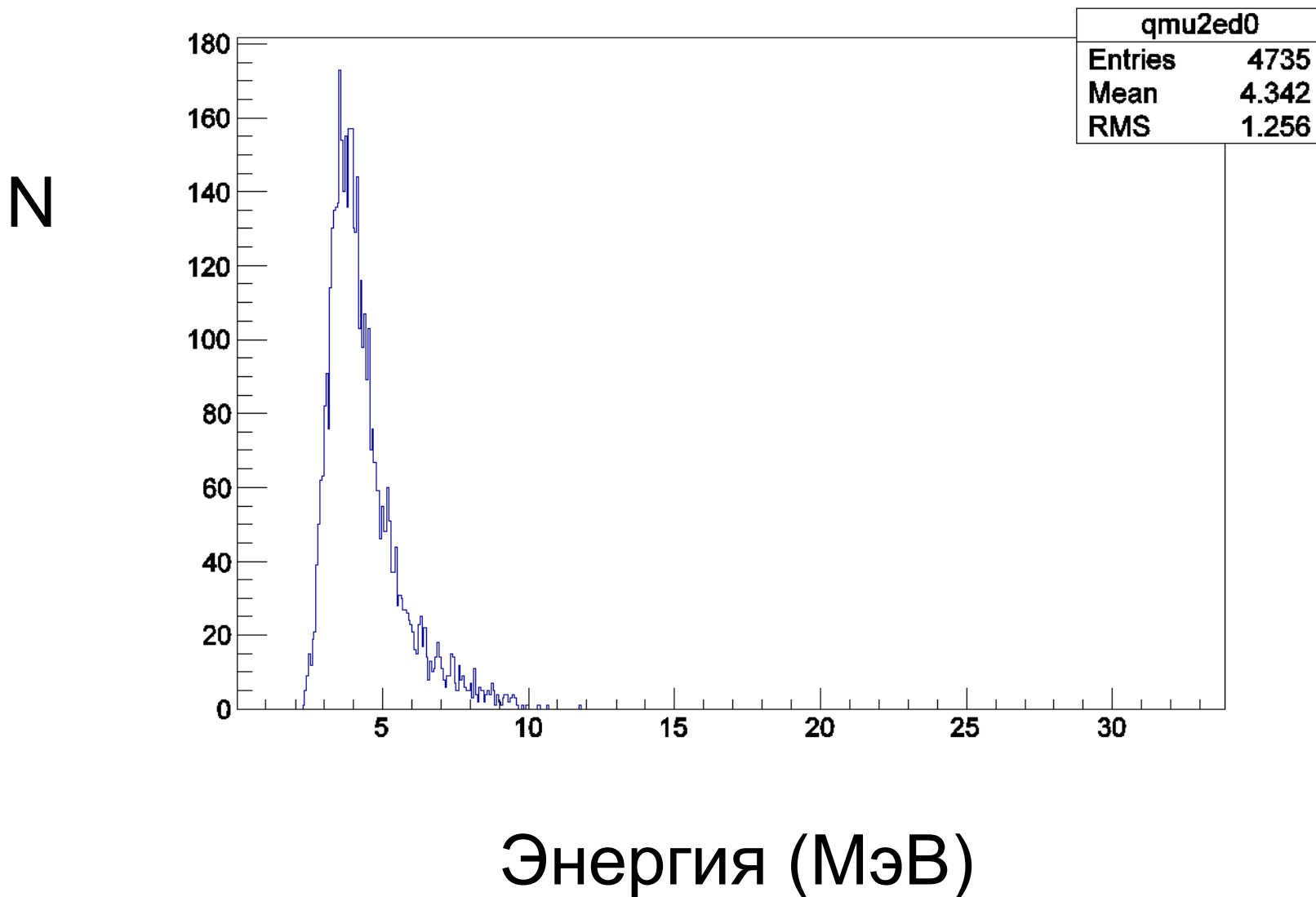
N



Энергия (МэВ)

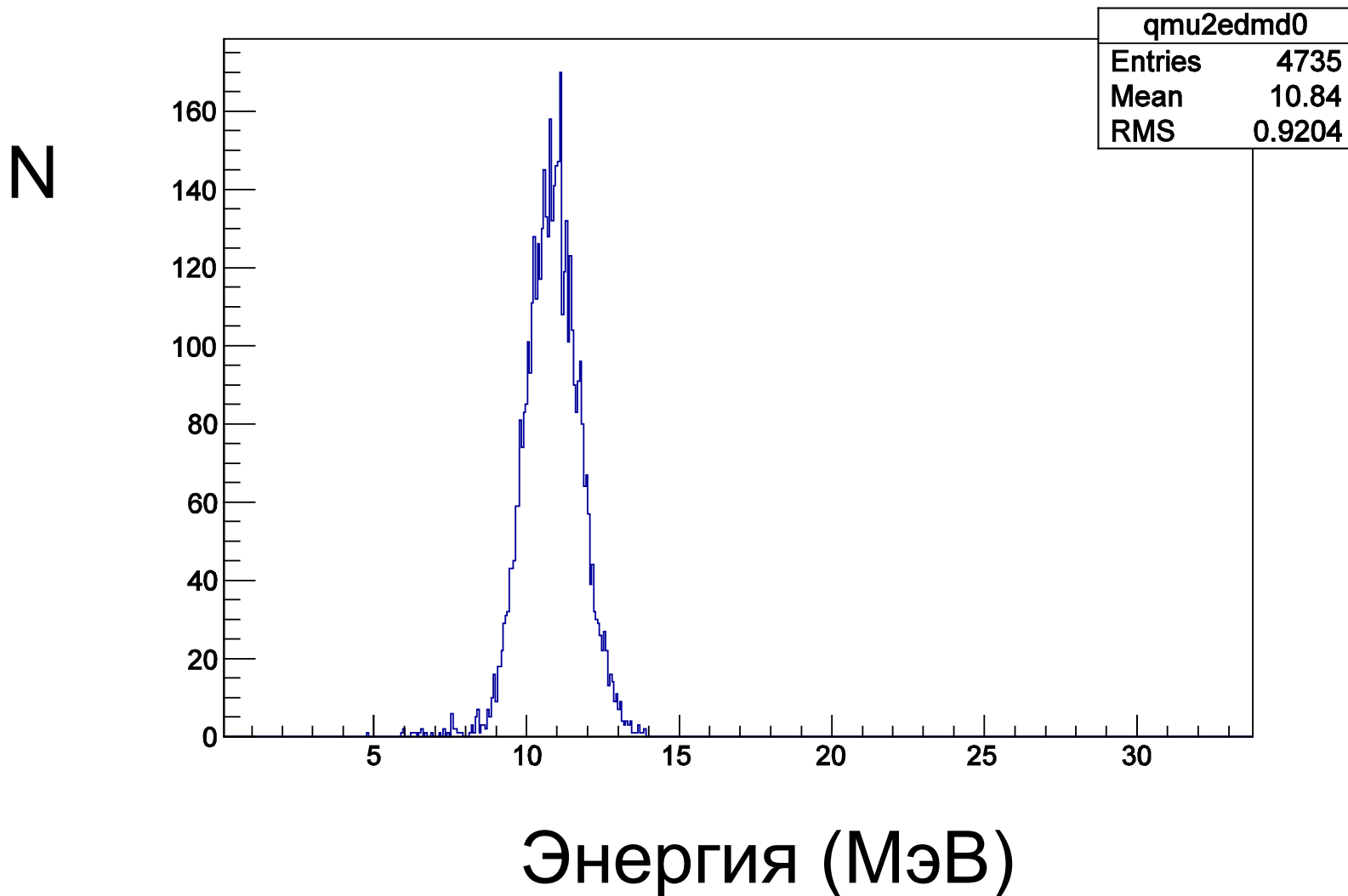
Экспериментальные спектры:

Энергетический спектр мюонов конверсии в детекторе E1



Экспериментальные спектры:

Суммарный энергетический спектр мюонов конверсии в детекторах E2+M



Сравнение скоростей ядерной реакции из анализа временных спектров:

Результат предварительной обработки

$$\lambda_{pt}^{\gamma} (I_{pt}=1) = 0.065 \pm 0.004(\text{stat}) \mu\text{s}^{-1}(\text{fusion rate})$$

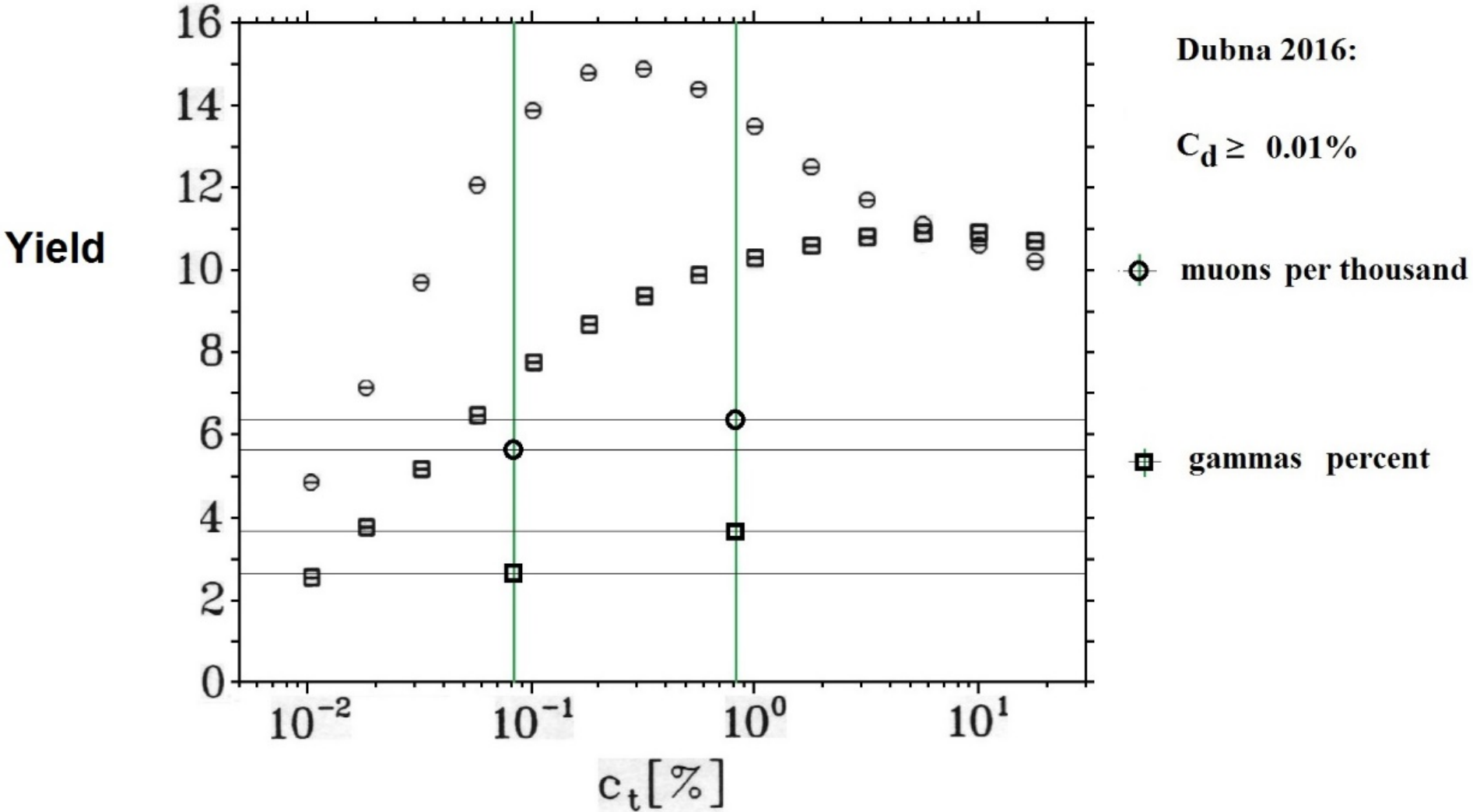
$$\lambda_{pt}^{\mu} (I_{pt}=0) = 0.11 \pm 0.01(\text{stat}) \mu\text{s}^{-1}(\text{muon conversion rate})$$

Результаты PSI (Хартман и др. 1993)

$$\lambda_{pt}^{\gamma} (I_{pt}=1) = 0.067 \pm 0.002_{-0.002}^{+0.005} \mu\text{s}^{-1}(\text{fusion rate})$$

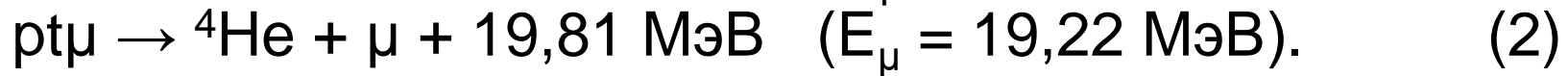
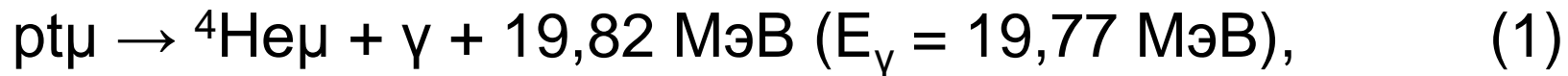
$$\lambda_{pt}^{\mu} (I_{pt}=0) = 0.15 \pm 0.02 \mu\text{s}^{-1}(\text{muon conversion rate})$$

Измеренные выходы одиночных гамма-квантов и мюонов конверсии в сравнении с экспериментом PSI (1993)



Результаты эксперимента

Предварительный анализ полученных данных позволил качественно подтвердить результаты коллаборации из PSI [P. Baumann, et al., "Muon-catalyzed pt-fusion", *Phys. Rev. Lett.* 70 (1993) 3720], об изменении выхода каналов реакции с гамма-квантом и мюоном конверсии (1, 2) в зависимости от концентрации трития в смеси.



Регистрация выходов парных частиц

Одной из целей эксперимента было обнаружение выхода e^+e^- пар, которые не наблюдались ни на пучках, ни в работе PSI из состояния мезомолекулы $pt\mu$.
Отношение выхода пар к выходу конверсионных мюонов, согласно теории, должно быть **0,73**.



Что было одним из главных мотивов эксперимента наряду с объяснением расхождения теории и эксперимента в системе $pt\mu$.

An electron-positron pair spectrometer for high energy decays of nuclei

C.P. Montoya, S. Schadmand, R. Varma, P.H. Zhang¹, R. Butsch², I. Diószegi³, D.J. Hofman
and P. Paul

Department of Physics, State University of New York at Stony Brook, Stony Brook, NY 11794, USA

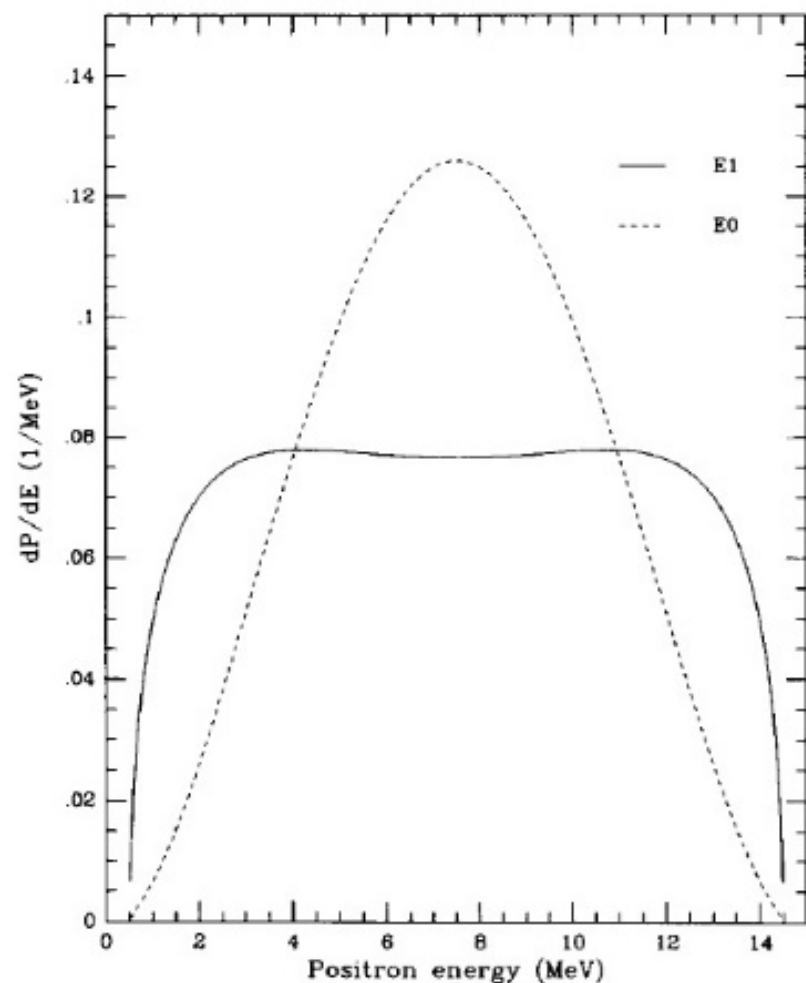


Fig. 3. Positron energy distribution for 15 MeV E0 and E1 transitions.

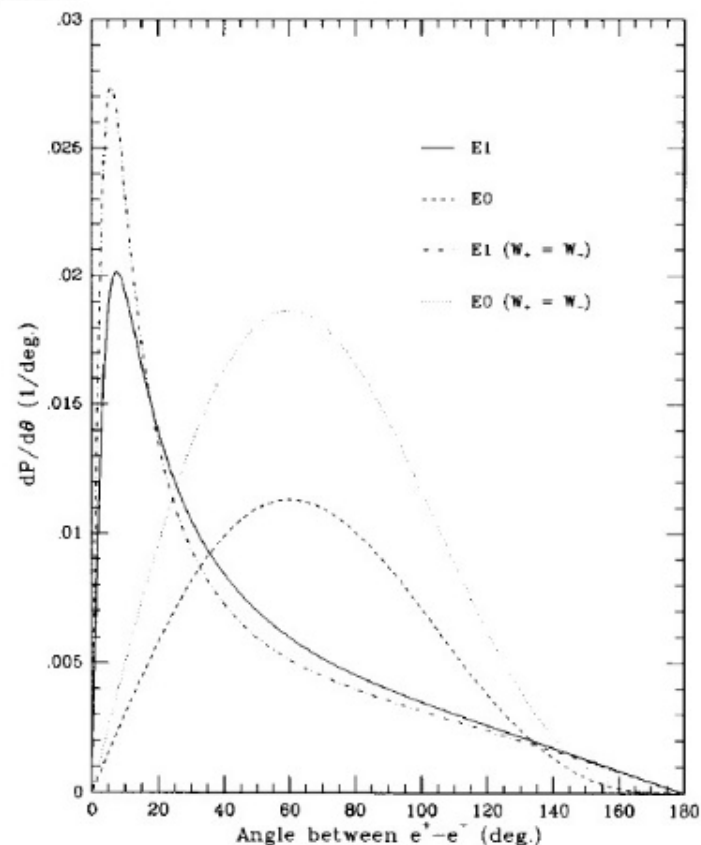
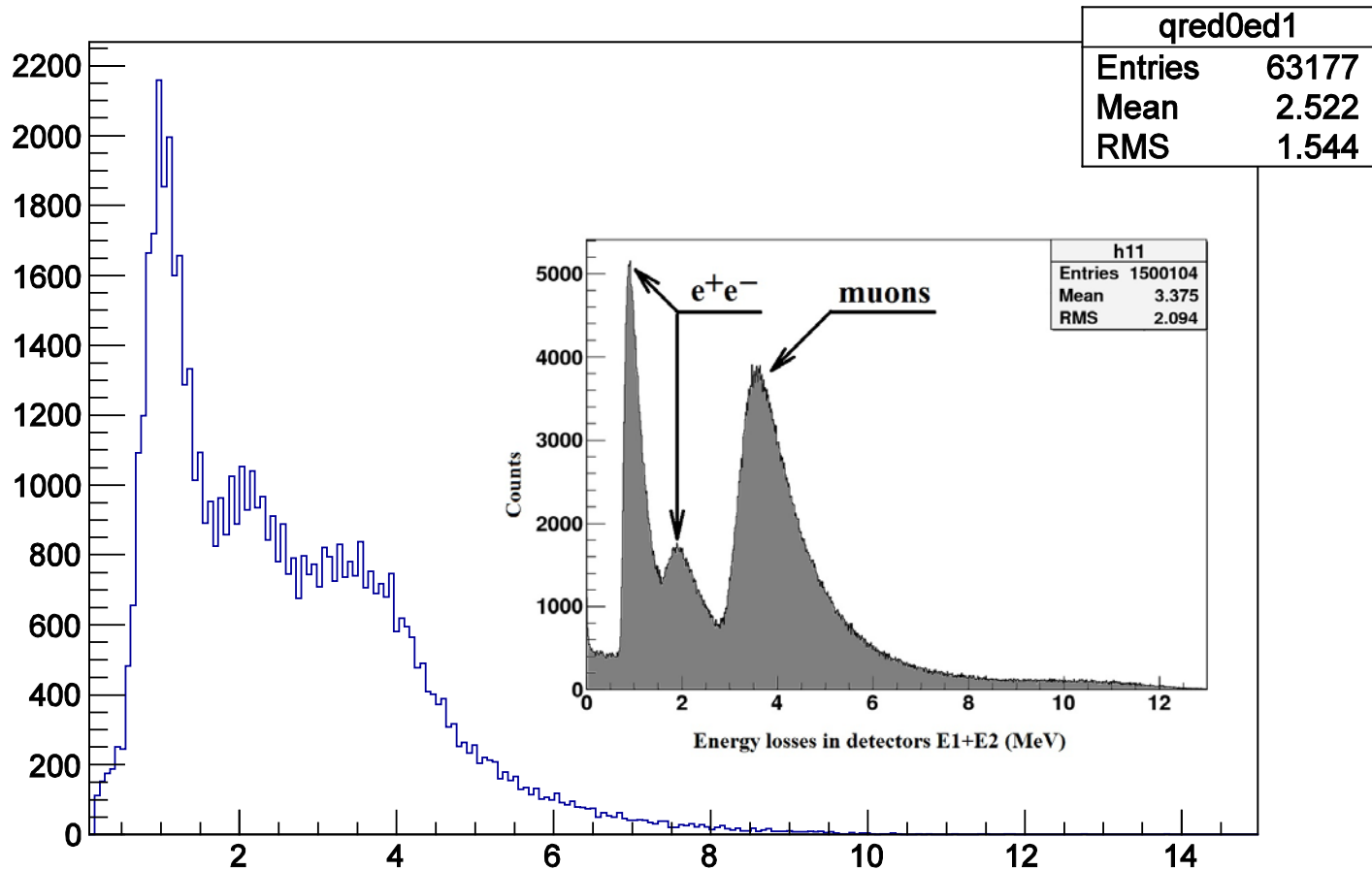


Fig. 4. The e^+e^- angular correlation for a 15 MeV E0 and E1 transition. Also indicated is the strong effect which a requirement of equal energy sharing has on the angular correlations. The normalization of the curves is such that the two E1 curves have equal areas and the E0 curves are obtained assuming transition probabilities equal to the respective E1 transitions.

Экспериментальные спектры (парные заряженные):

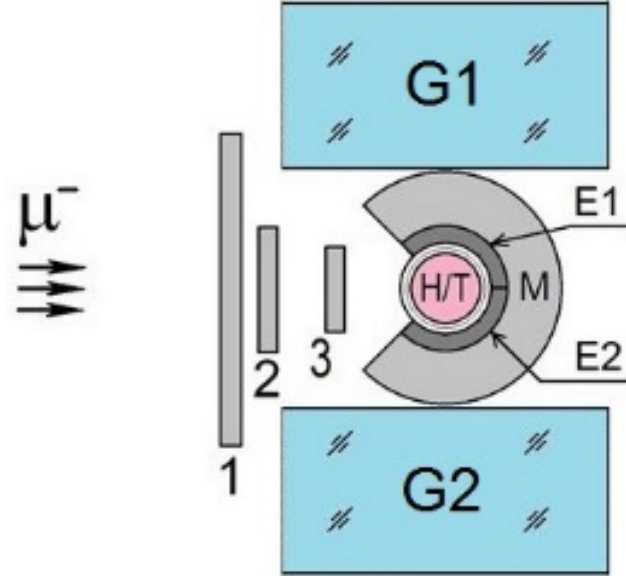
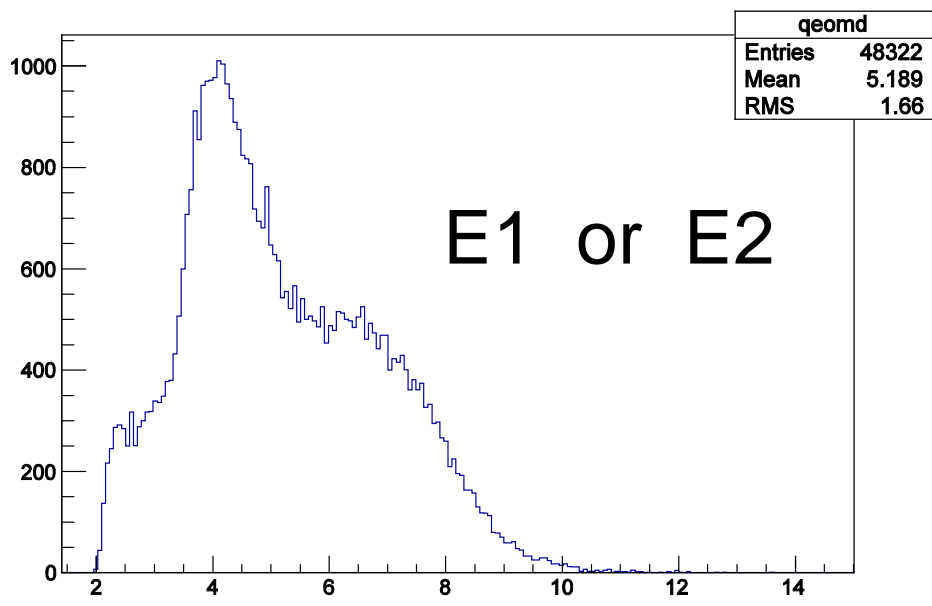
Суммарный энергетический спектр мюонов конверсии и электрон-позитронных пар в детекторах E1+E2

N



Энергия (МэВ)

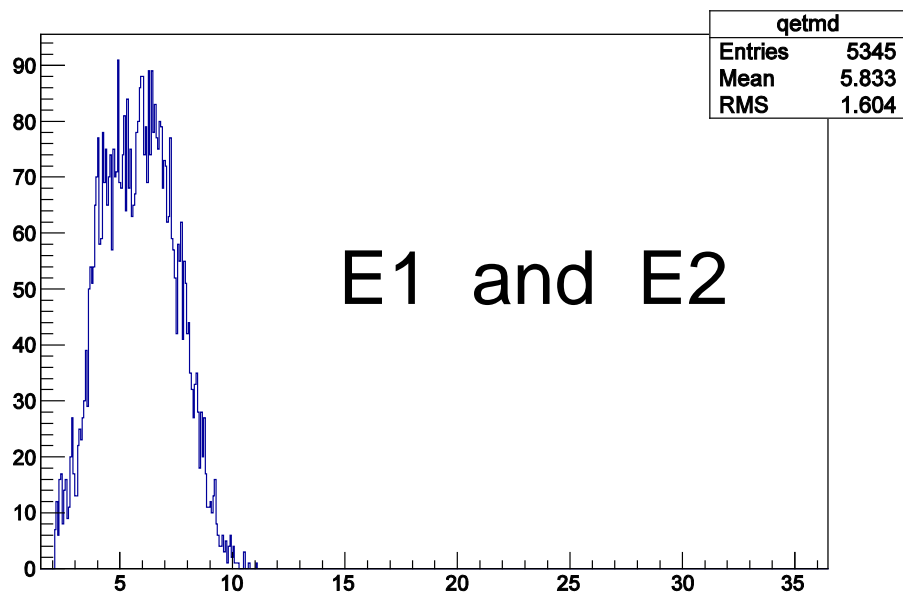
Спектры M(E1,E2): $p\mu$, $p\mu \rightarrow e^+ + e^-$



$C_t = 0$

$N(E1 \text{ or } E2) = 4194$

$N(E1 \text{ and } E2) = 53$



$C_t = 0,8$

$N(E1 \text{ or } E2) = 48322$

$N(E1 \text{ and } E2) = 5345$

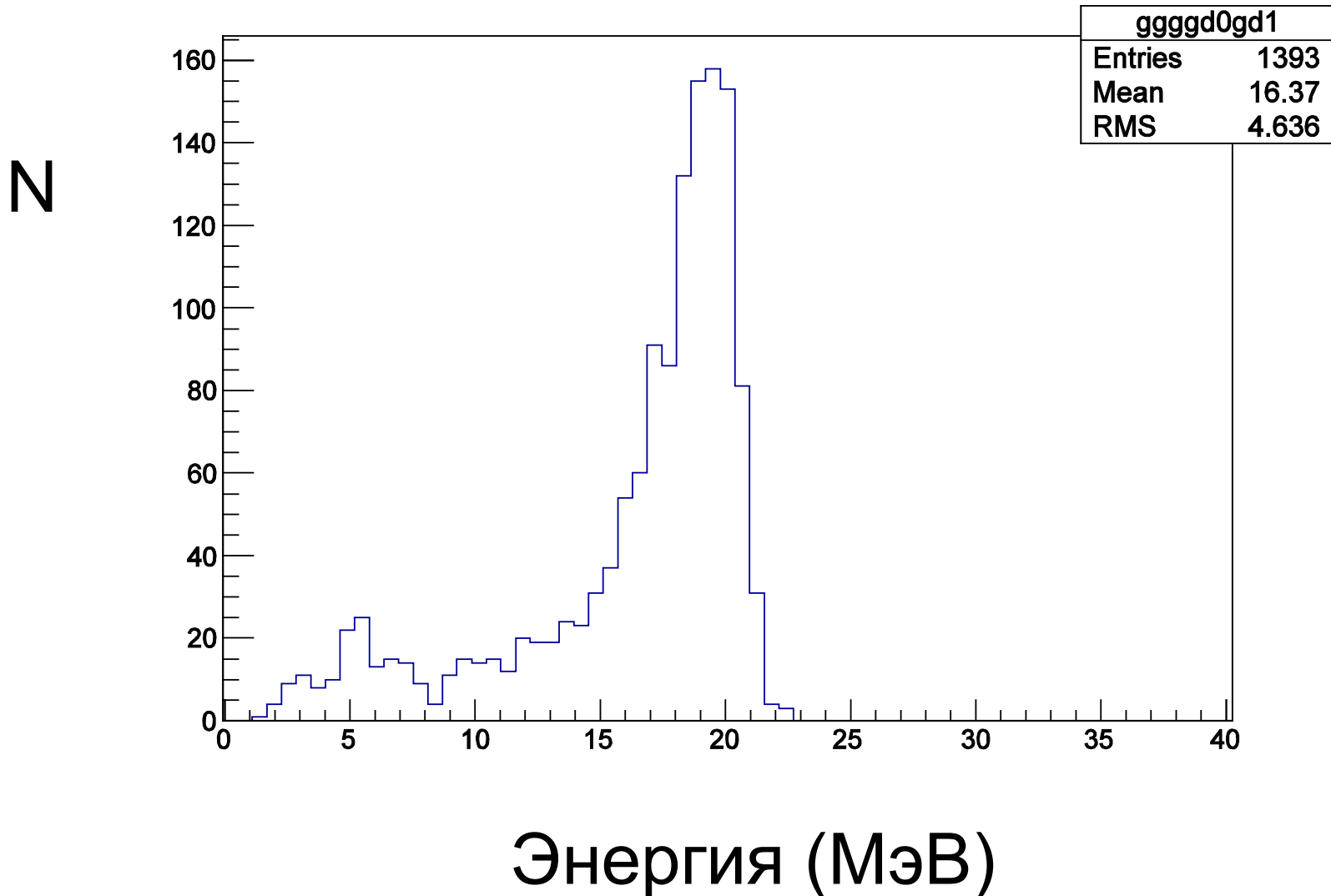
$C_t = 0,08$

$N(E1 \text{ or } E2) = 46618$

$N(E1 \text{ and } E2) = 4868$

Экспериментальные спектры (парные нейтральные):

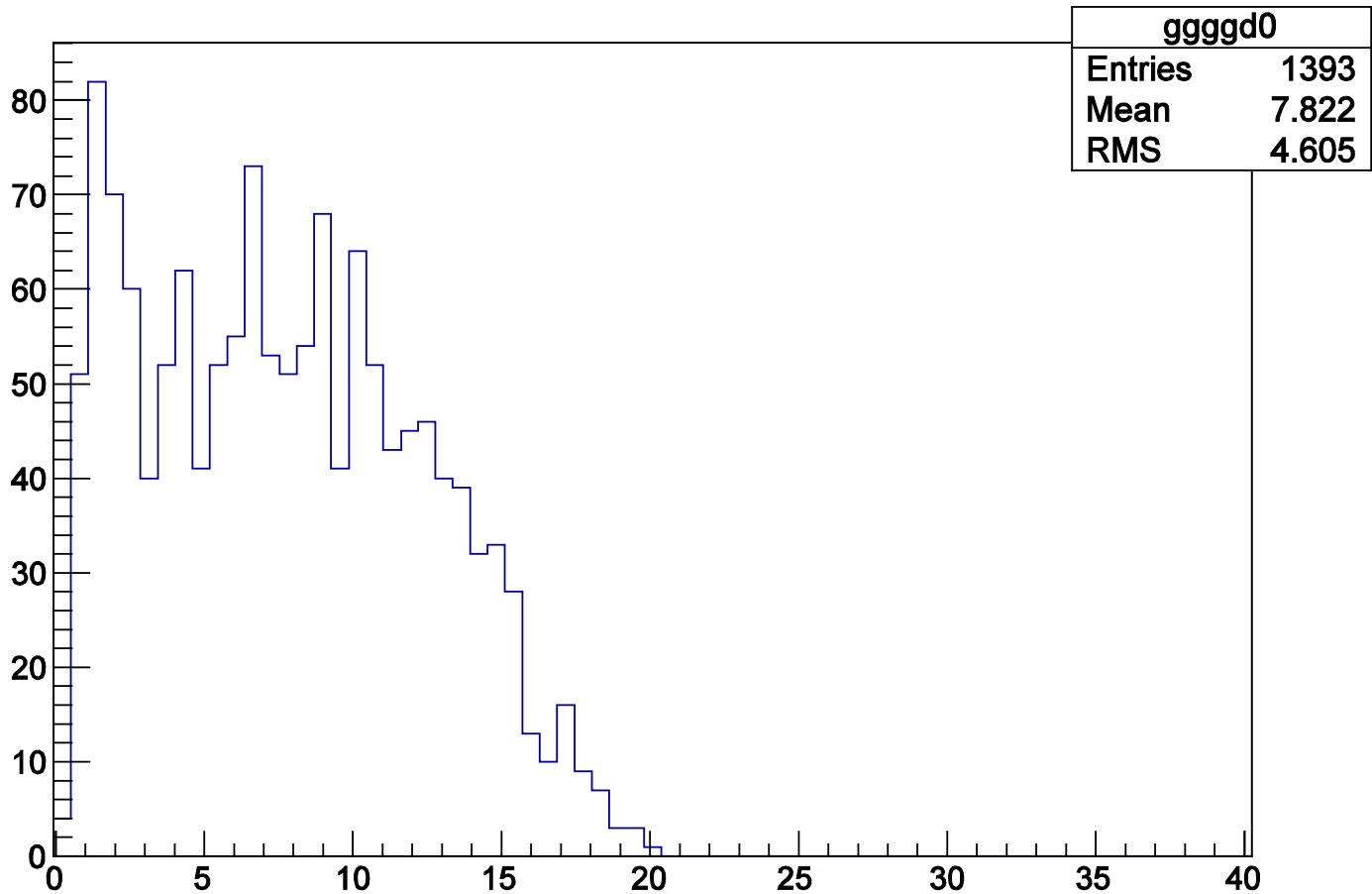
Суммарный энергетический спектр пары гамма-квантов
в детекторах G1+G2



Экспериментальные спектры:

Энергетический спектр одного из пары гамма-квантов
в детекторе G1

N

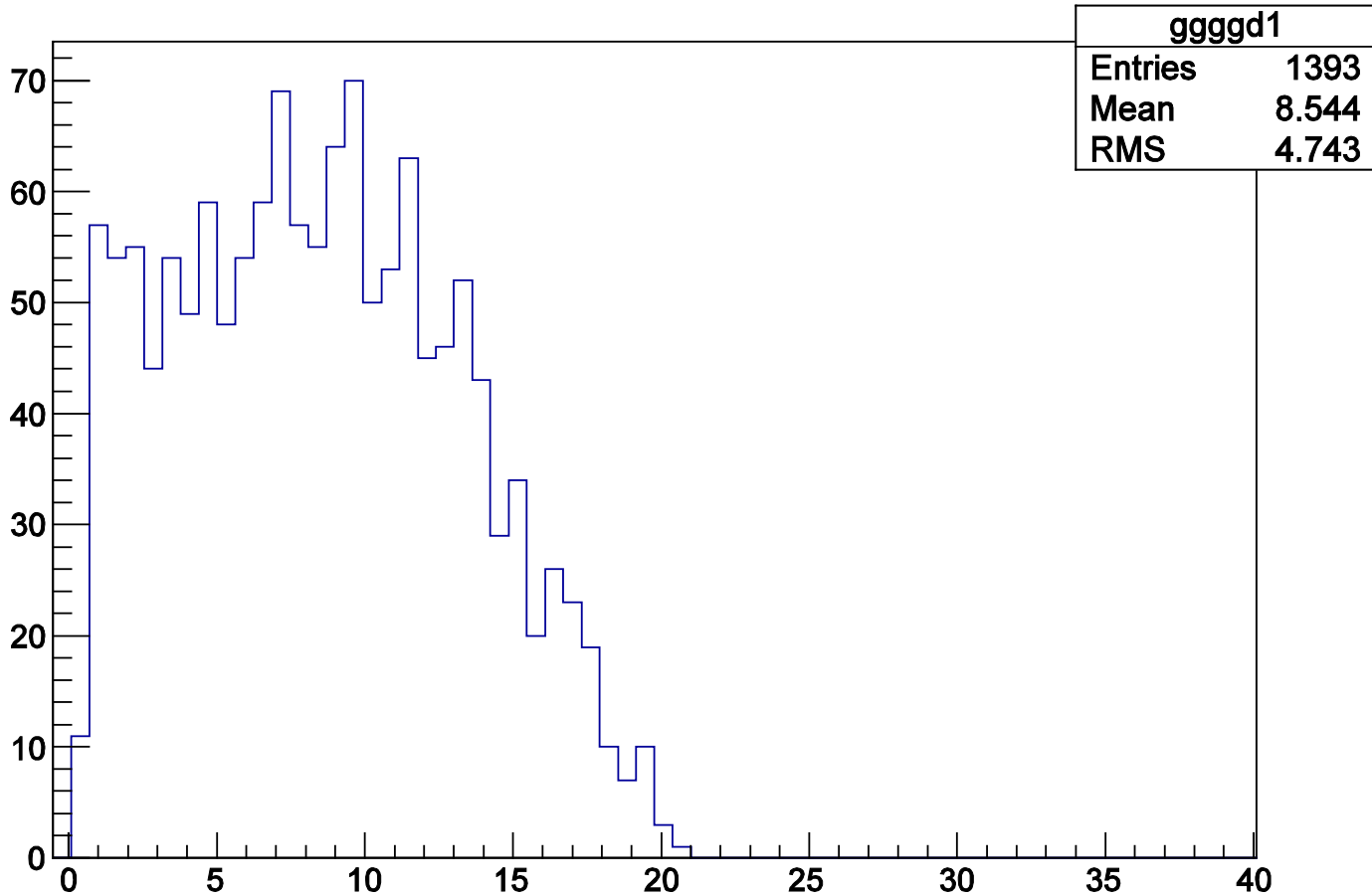


Энергия (МэВ)

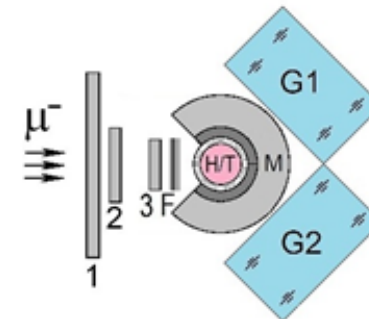
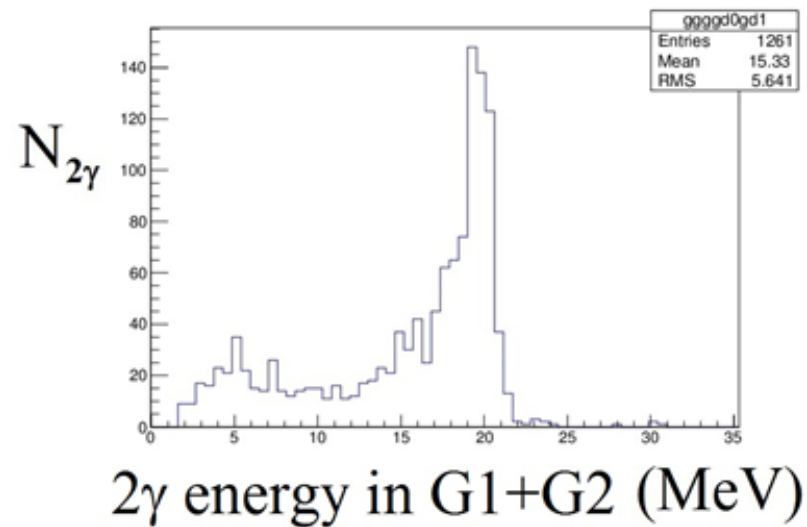
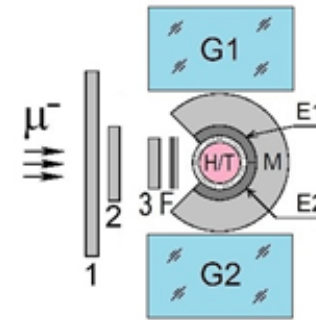
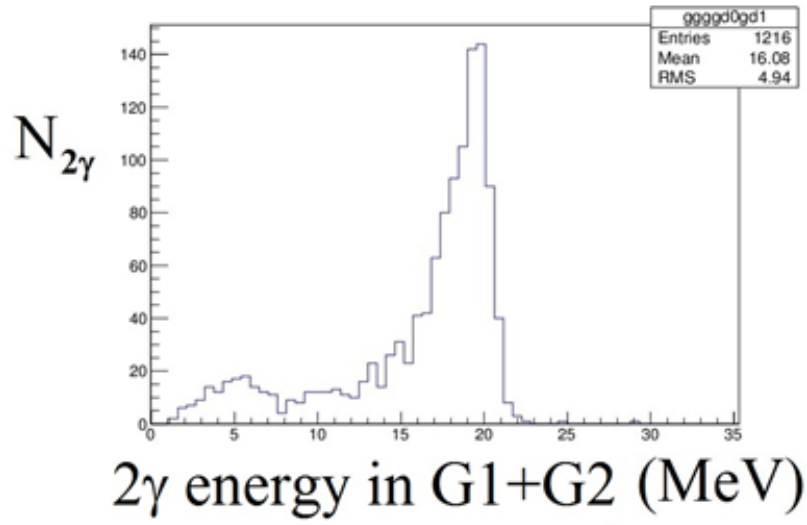
Экспериментальные спектры:

Энергетический спектр второго из пары гамма-квантов
в детекторе G2

N



Энергия (МэВ)



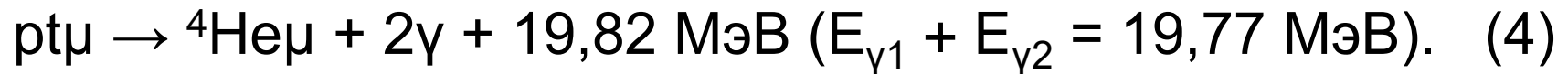
Измерение 2016 г. при $\sigma_t = 0.08\%$ трития выхода реакции (4) на одинаковой статистике для двух различных относительных положений гамма-детекторов: под относительным углом **180** - сверху; **110** градусов - снизу

Регистрация пар e^+e^- и пар гамма-квантов при pt синтезе

Впервые наблюдался канал реакции (3) с выходом электрон-позитронной пары. Общая статистика, набранная на установке ТРИТОН в 2016 году – около **15 тысяч** зарегистрированных событий.



Также удалось зарегистрировать канал реакции (4) с выходом двух гамма-квантов. Общая статистика – около **трех тысяч** (зарегистрированных) двойных событий (4), удовлетворяющих критериям отбора для гамма-квантов, одновременно зарегистрированных в разных гамма-детекторах.



Измерения с различной геометрией установки в ноябре 2016 г. (гамма-детекторы были установлены сначала под относительным углом **180**, затем **110** градусов) позволили сделать вывод в пользу отсутствия угловой корреляции при выходе пар 2γ (4), а также исключить объяснение наблюдаемых двойных событий перерассеянием из одного гамма-детектора в другой.

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

1) В водороде, обогащенном дейтерием до 2—3%, следовало бы произвести более точное, чем в⁵, измерение распределения γ -квантов по времени, в частности обнаружить несколько характерных времен, соответствующих реакции из различных спиновых состояний. Точное определение абсолютного выхода γ -квантов в указанной смеси может представить интерес для изучения слабого взаимодействия μ -мезонов с нуклонами. Действительно, поскольку в результате реакции $p + d \rightarrow \text{He}_3 + \gamma$ мезон остается на орбите He_3 (см. § 6), представляется возможность наблюдать захват μ -мезона ядром He_3 : $\mu^- + \text{He}_3 \rightarrow t + \nu$. Матричный элемент перехода может быть установлен из данных по β -распаду трития $t \rightarrow \text{He}_3 + e^- + \nu$, и, таким образом, изучение этого процесса дает возможность точного измерения константы слабого взаимодействия $\mu^- + p \rightarrow n + \nu$ (см. также²³).

2) При значительно больших концентрациях дейтерия (порядка 60—80%) по числу $p + d$ - и $d + d$ -реакций можно было бы установить соотношение между вероятностью образования $p d \mu$ - и $d d \mu$ -молекул.

Кроме того, в указанной смеси благодаря реакции $d + d \rightarrow t + n$ в мезомолекуле $d d \mu$ имеется вероятность, равная $\approx 2\%$ того, что μ -мезон окажется на орбите трития. В дальнейшем мезоатом $t \mu$ может образовать мезомолекулу $p t \mu$, что даст возможность наблюдать реакции $p + t$, в частности рождение пар e^+ , e^- в реакции $p + t \rightarrow \text{He}_4 + e^+ + e^-$.

3) Представляет интерес измерение абсолютного выхода реакций, вызываемых μ -мезонами в чистом дейтерии, а также вероятности «прилипания» μ -мезона к образующемуся He_2 .

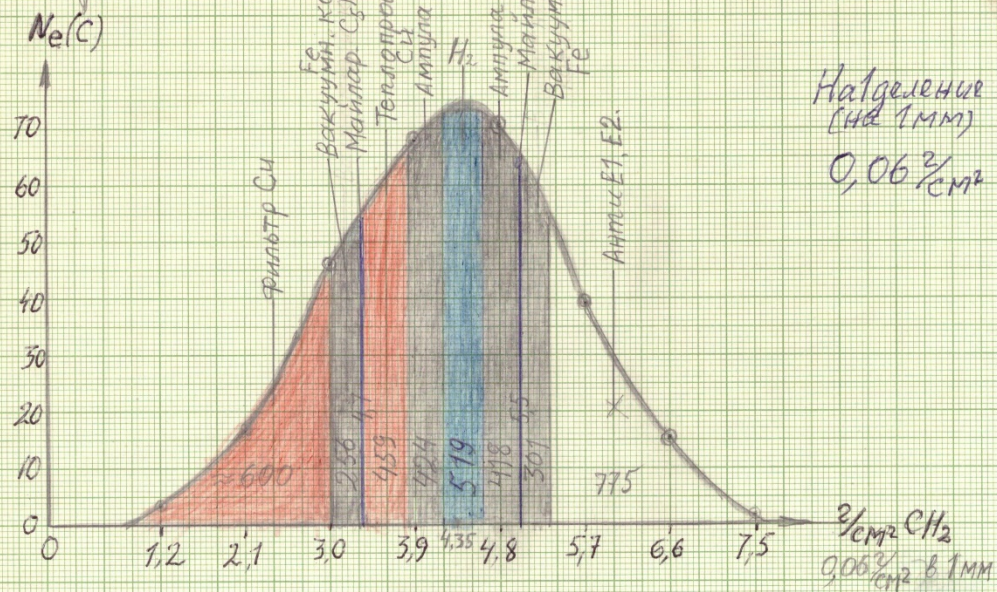
4) В водороде, обогащенном тритием до 0,01—0,1%, вполне возможно наблюдение реакций $p + t$ в мезомолекулах $p t \mu$. К сожалению, в этом случае невозможно использовать пузырьковую камеру ввиду активности трития. Однако наиболее красивое явление—рождение пар e^+ , e^- ,—по-видимому, можно наблюдать с помощью счетчиков.

ВЫВОДЫ

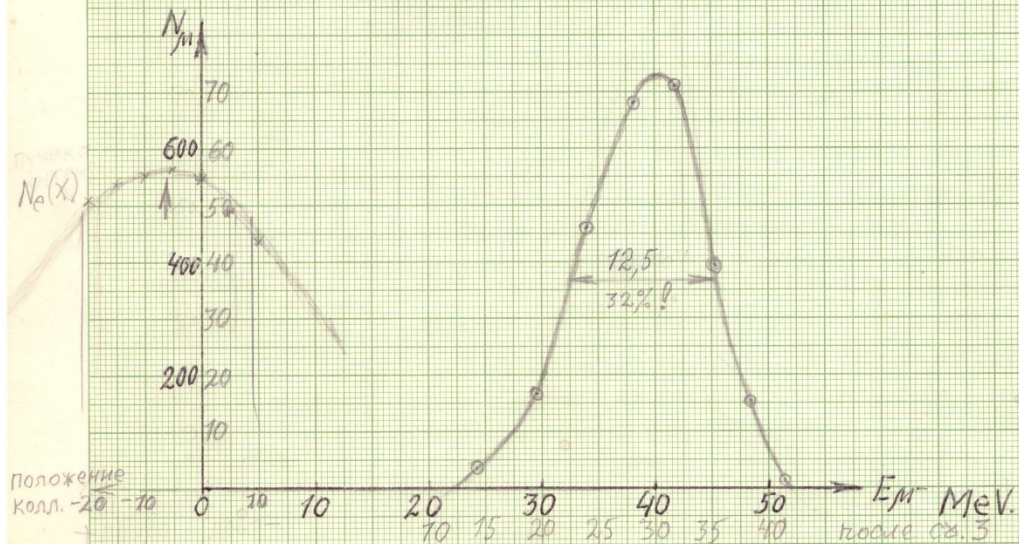
1. В эксперименте наблюдались известные ранее каналы реакции $p\bar{t}$ -синтеза с выходом одиночных гамма-квантов и мюонов конверсии. Полученные предварительные результаты по скоростям ядерной реакции $p+t$ не противоречат выводам экспериментаторов Хартмана и др. (1993);
2. Впервые при исследовании реакций $p\bar{t}$ -синтеза обнаружен канал ядерной реакции с выходом электрон-позитронных пар и канал с выходом пары гамма-квантов;
3. Полученные результаты подтверждают теоретические предсказания Я. Б. Зельдовича и С. С. Герштейна (1960 г.) о продуктах выхода в ядерных реакциях в холодном водороде с участием мюонов.

Научный проект «Экспериментальное исследование процесса $p\bar{t}$ -синтеза в мюонной молекуле $p\bar{t}\mu$ с целью уточнения констант ядерной реакции. ТРИТОН» был поддержан грантом РФФИ №12-02-00089.

Опубликован Материал в журнал «Новости ОИЯИ» №3 (2016) стр. 16-20.



Распределение остановок мюонов в мишенях, оболочках и медном фильтре.



Энергетический спектр мюонов. Восстановлен по пробегам в CH_2 . $P_M = 100 \text{ MeV/c} (\pm 10\%)$

I. Остановки мезонов. Сколько, где.

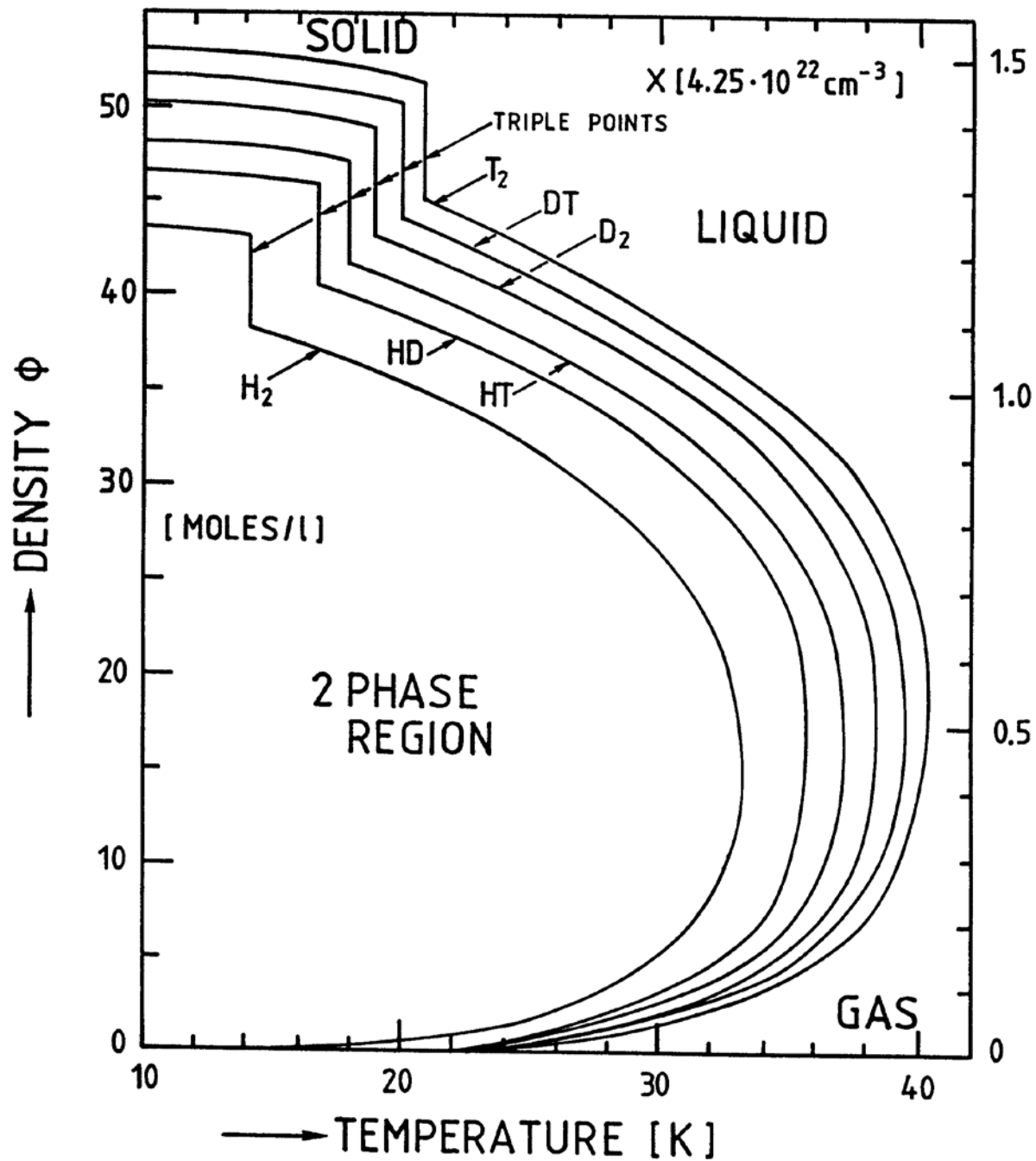
№	Мишень, Материалы (около)	Размеры высота, ширина, толщина [см]	Объем [см ³]	Плотн ρ [г/см ³]	Вес [г] (на пуга Snugka)	Толщина [г/см ²] 16 см ² $\frac{\rho}{S}$	Тормозная способн $\frac{dE}{dx}$ [MeV/г/см ²]	Пересчет * Толщина ρ CH ₂ топ. сн 2,076 г/см ²	Каналов (0,06 см CH ₂ в канал)	Счет в каналх (средний)	Остан. м-в матери. для Z
1	Жидкий водород H ₂ 0,99 + T ₂ 0,01 22K	φ 3,5, h 5	50	0,07	3,5	0,219	4,034	0,426	71	73	519
2	Ампула и оболоч (считать Fe (из X181101) нерж. ст)	2(0,06 · 5 · 3,5)*	2,1	7,9	16,6	1,037	1,451	0,726 2 · 0,363	605 605	70 69	842 418
3	Термопровод Si	2,4 · 0,1 · 5	1,2	8,96	10,7	0,668	1,403	0,452	754	61	459
4	Майларовая плен. (теплоотражат) C ₅ H ₄ O ₂	$\frac{77,5 \cdot 0,75 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 3,5 \cdot 6 \cdot 12,5 \cdot 10^{-4}}$ слоев	0,131	1,39	0,182	0,0114	1,848	0,1016 2 · 0,0508	0,085 0,085	65 55	102! 47
5	Вакуумный кожух (считать как Fe)	2(0,05 · 5 · 3,5)	1,75	7,9	13,8	0,862	1,451	0,603 2 · 0,3015	5,02 5,02	60 51	557 256
6	Медный фильтр + оболочка ст М. Si	φ 5 · 0,51	≈ 10	8,96	≈ 90	≈ 5,6	1,403	3,79 ~ 60	30	20	~ 600 ± 10%

$$* \frac{\rho(\text{CH}_2)}{S} \cdot \frac{dE}{dx}(\text{CH}_2) = \frac{\rho(Z)}{S} \cdot \frac{dE}{dx}(Z),$$

$$\frac{\rho(\text{CH}_2)}{S} = \frac{\rho(Z)}{S} \cdot \frac{\frac{dE}{dx}(Z)}{\frac{dE}{dx}(\text{CH}_2)}$$

$$\begin{array}{r} 71 \\ 605 \\ 0,85 \\ \hline 1400 \end{array} \quad \begin{array}{r} 605 \\ 754 \\ 0,85 \\ \hline 1444 \\ 52 \\ \hline 1964 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} 35 \cdot 10 = 350 \\ 17 \cdot 10 = 170 \\ 7510 = 70 \\ 10 \\ \hline 11 \cdot 40 = 440 \\ 10 \cdot 22 = 220 \\ 10 \cdot 10 = 100 \\ 5 \cdot 3 = 15 \\ \hline \approx 600 \end{array}$$



Nuclear Electric Monopole Transitions in O^{16} , Ca^{40} , Ge^{72} , and Zr^{90} †

M. NESSIN, T. H. KRUSE, AND K. E. EKLUND

Columbia University, New York, New York

(Received August 29, 1961)

A study was made of electric monopole transitions from the 0^+ first excited states of certain nuclei. A search for 6.05-Mev O^{16} $E0$ conversion electrons gave an upper limit of 1×10^{-4} for the ratio of the probability for conversion electrons to that of pair emission.

Ca^{40} $E0$ conversion electrons were observed and a ratio of $W_{\text{conversion}}/W_{\text{pair}} = (6.94 \pm 0.20) \times 10^{-3}$ was obtained. The momentum distributions of both components of pairs from the first excited state were observed. An upper limit of 6×10^{-3} was placed on the ratio of double gamma emission to pair emission. The energy of the first excited state was found to be 3.353 ± 0.003 Mev by measurement of the conversion electron energy.

An excitation function for population of the first excited state of Ge^{72} by inelastic scattering of protons was observed between 2.3 and 6.2-Mev proton bombarding energy. The K and $(L+M$

$+N+O)$ $E0$ conversion electrons were resolved and the ratio $W_K/W_{(L+M+N+O)} = 8.70 \pm 0.06$ was obtained. The energy of the first excited state was found to be 0.690 ± 0.001 Mev.

An excitation function for population of the first excited state of Zr^{90} by inelastic scattering of protons was obtained between 3.35 and 6.5 Mev proton bombarding energy. The momentum distributions of both components of pairs were observed. The energy of the first excited state was measured as 1.762 ± 0.002 Mev. 2.38 ± 0.08 was obtained for the ratio $W_{\text{conversion}}/W_{\text{pair}}$. The K and $(L+M+N+O)$ conversion electrons were resolved and the ratio $W_K/W_{(L+M+N+O)} = 7.06 \pm 0.08$ was obtained.

All results are consistent within experimental errors with theoretical predictions.

Double Gamma Decay in ^{40}Ca and ^{90}Zr

J. Schirmer, D. Habs, R. Kroth, N. Kwong, D. Schwalm, and M. Zirnbauer
*Max-Planck-Institut für Kernphysik and Physikalisches Institut der Universität Heidelberg,
D-6900 Heidelberg, Federal Republic of Germany*

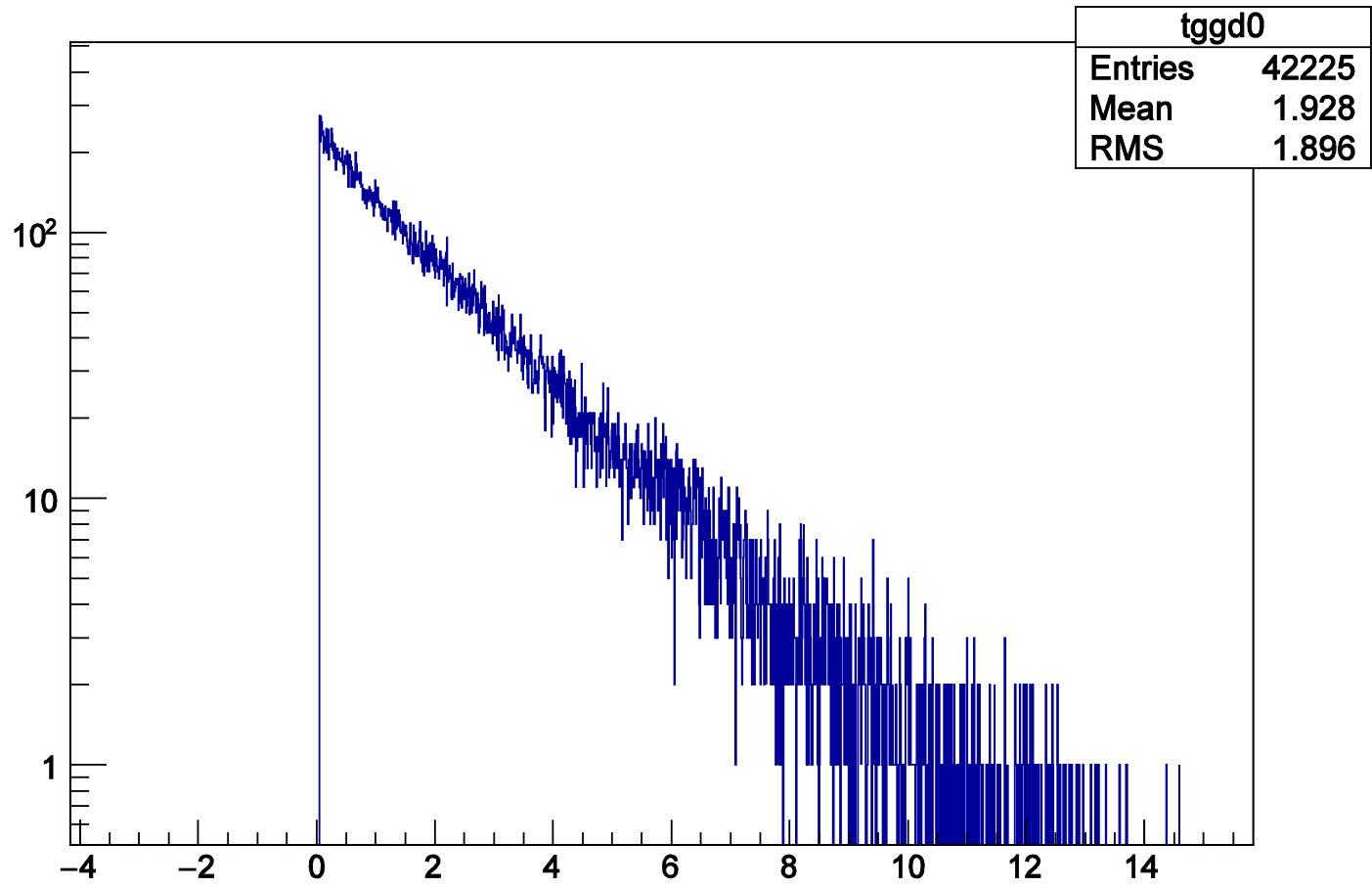
and

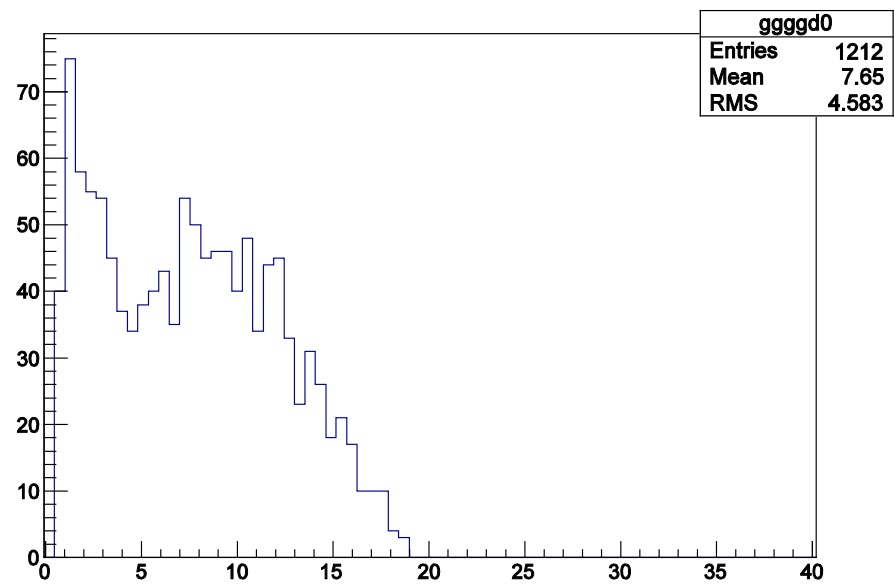
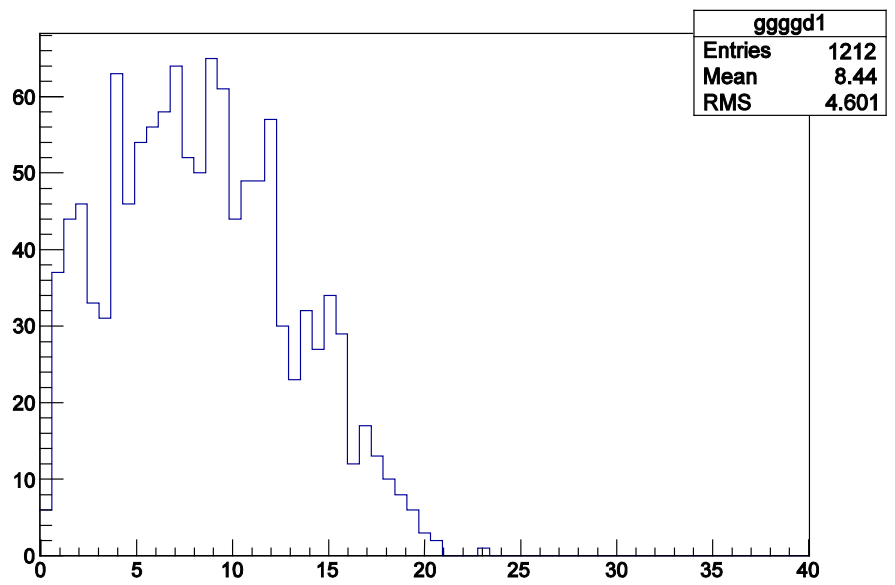
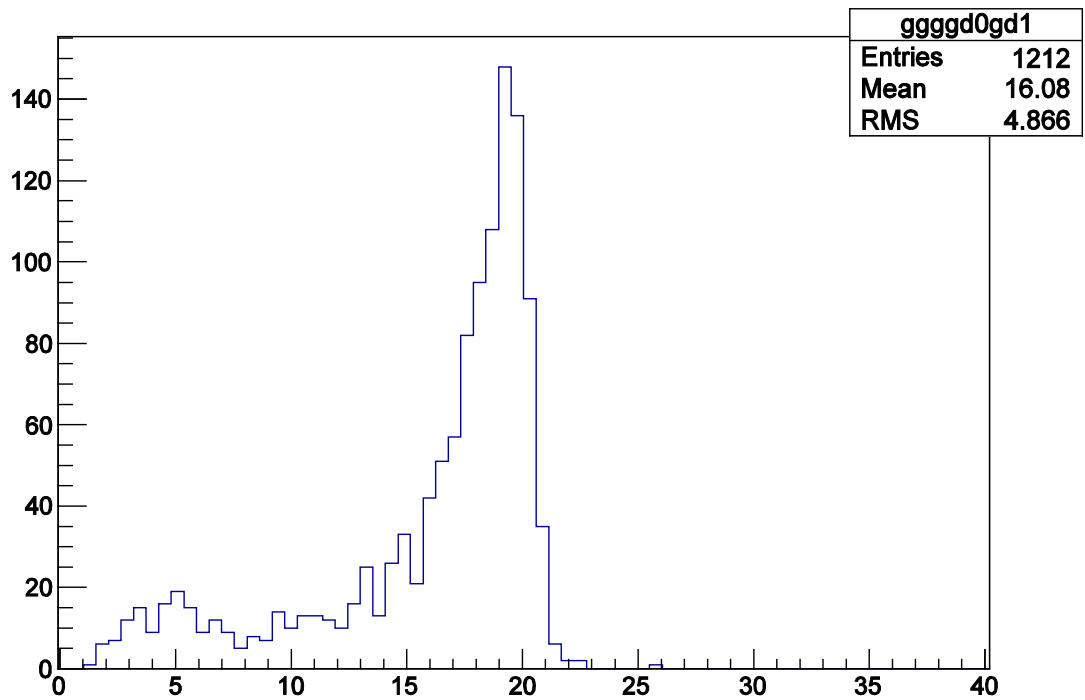
C. Broude

Weizmann Institute of Science, 76100 Rehovot, Israel
(Received 13 August 1984)

The rare double gamma decay of the first excited 0^+ state in ^{40}Ca and ^{90}Zr has been measured with a segmented 4π NaI detector system, which allows suppression of the perturbing background due to positron annihilation in flight. In both cases the directional correlation of the two photons is found to be asymmetric around 90° , which is explained by an interference of $2E1$ and $2M1$ transitions. The deduced $M1$ quenching factors agree with those from (e,e') and (p,p') measurements.

PACS numbers: 23.20.En, 27.40.+z, 27.60.+j

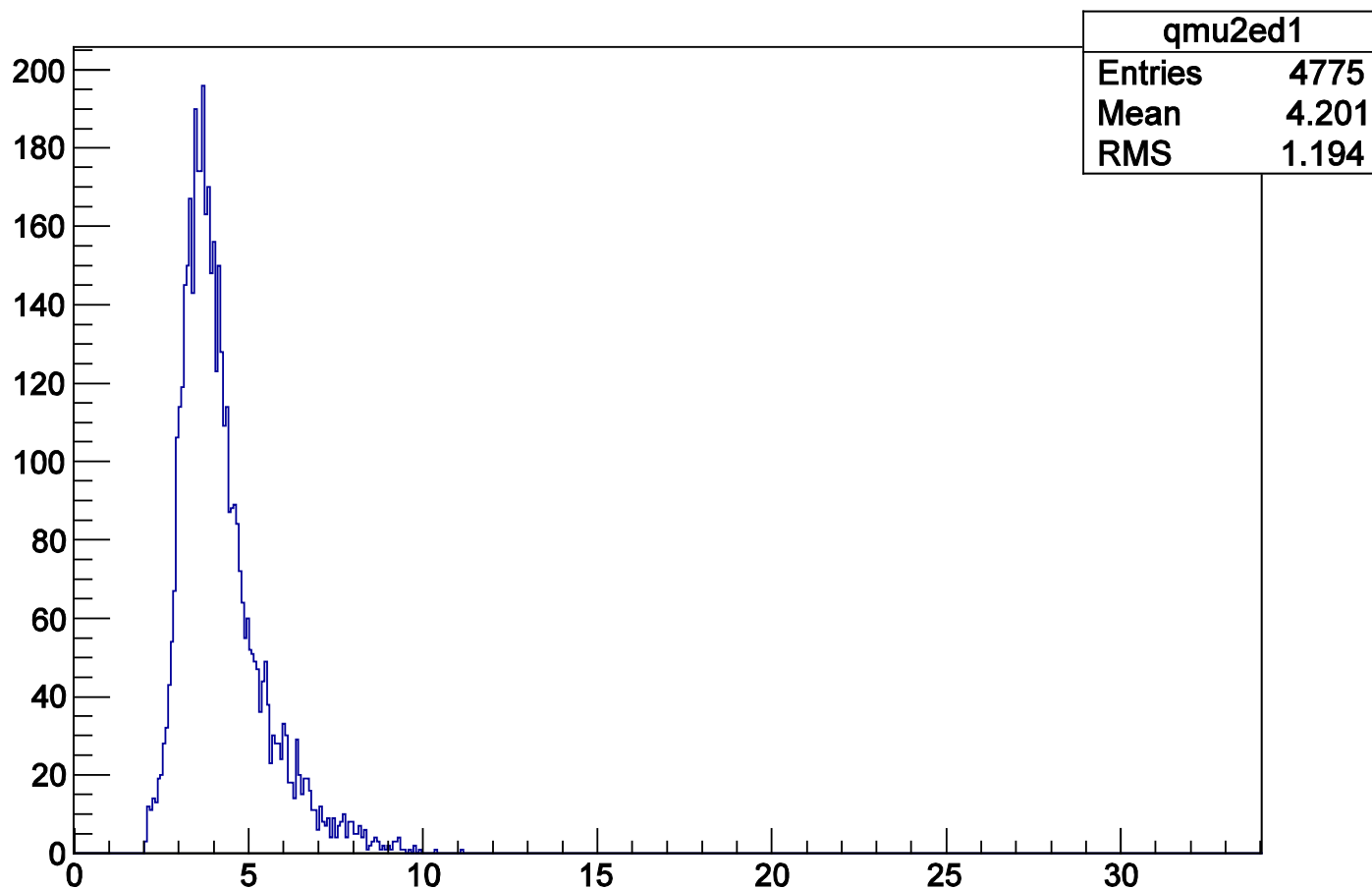




Экспериментальные спектры:

Энергетический спектр мюонов конверсии в детекторе E2

N



Энергия (МэВ)