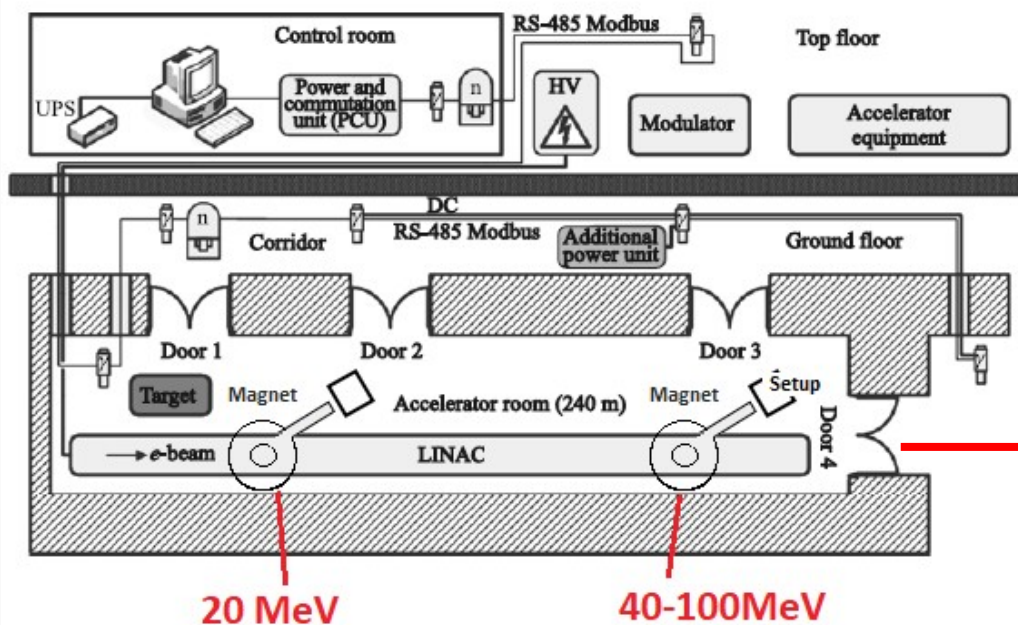




Study of $^{209}\text{Bi}(\text{gamma}, n)$
relative reaction yields
in energy range 40-60 MeV

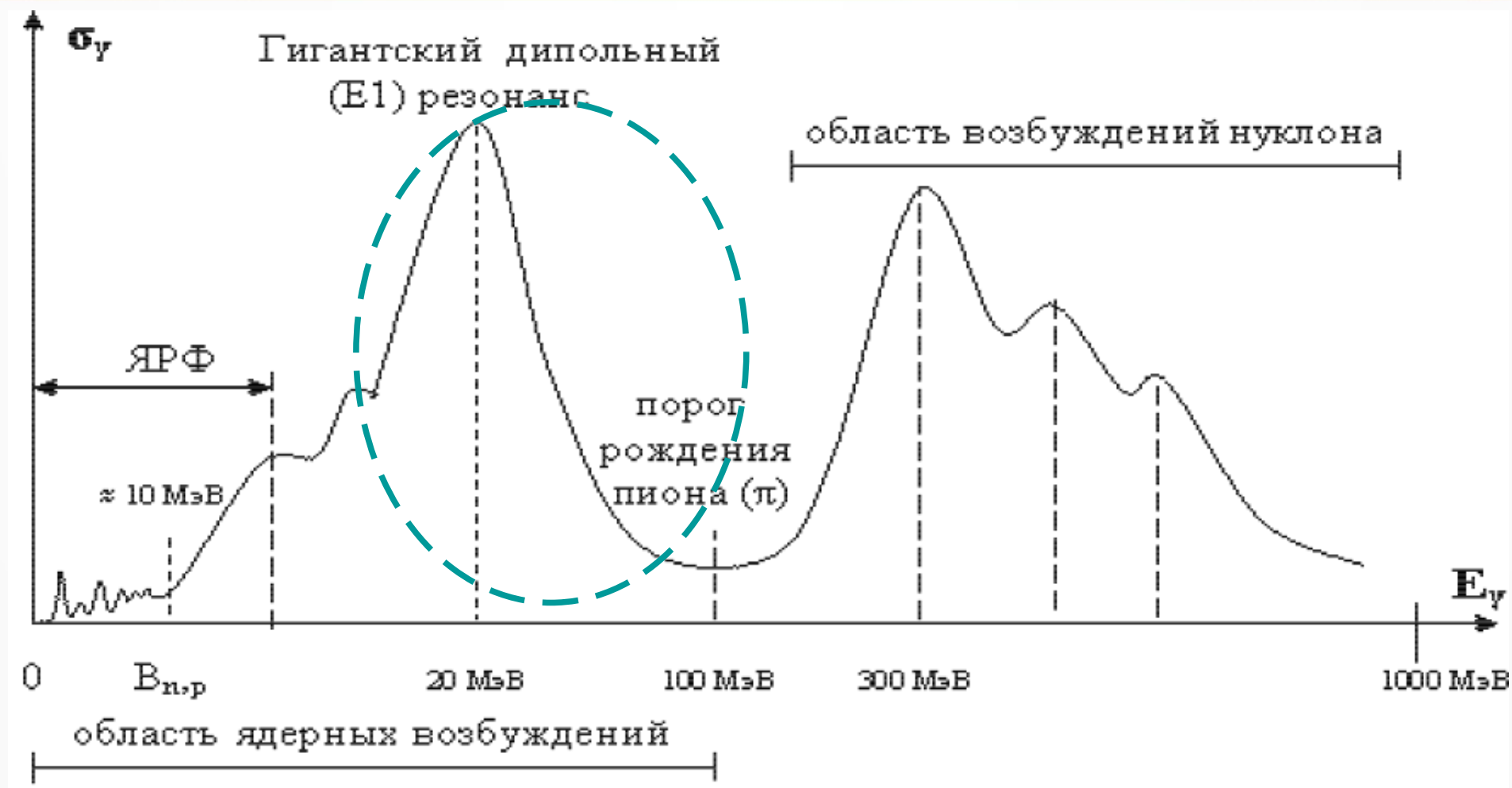
Nucleus-2024

Установка LINAК-200 (в режиме пусконаладки)



- Исследование радиостойкости на выводе 20 МэВ (2018)
- Калибровка энергии выведенного пучка в одноэлектронном режиме 20.9 ± 0.1 МэВ (2019)
 - Активационный анализ с калибровкой относительно Микротрона (ЛЯР)
 - Проверка линейности традиционных калориметрических детекторов
- Измерение относительных выходов изотопов Bi на энергиях до 100 МэВ (2020)
 - Наблюдены Bi-201 и Bi-200
 - Наблюдаются линии изотопов при энергиях пучка ниже порога рождения
- Измерение выходов изотопов Bi на энергиях 40-60 МэВ (2022)
 - Мишени из особо-чистого висмута
 - Мониторинг тока ускорителя, попадающего на конвертер

Сечение фотопоглощения атомными ядрами

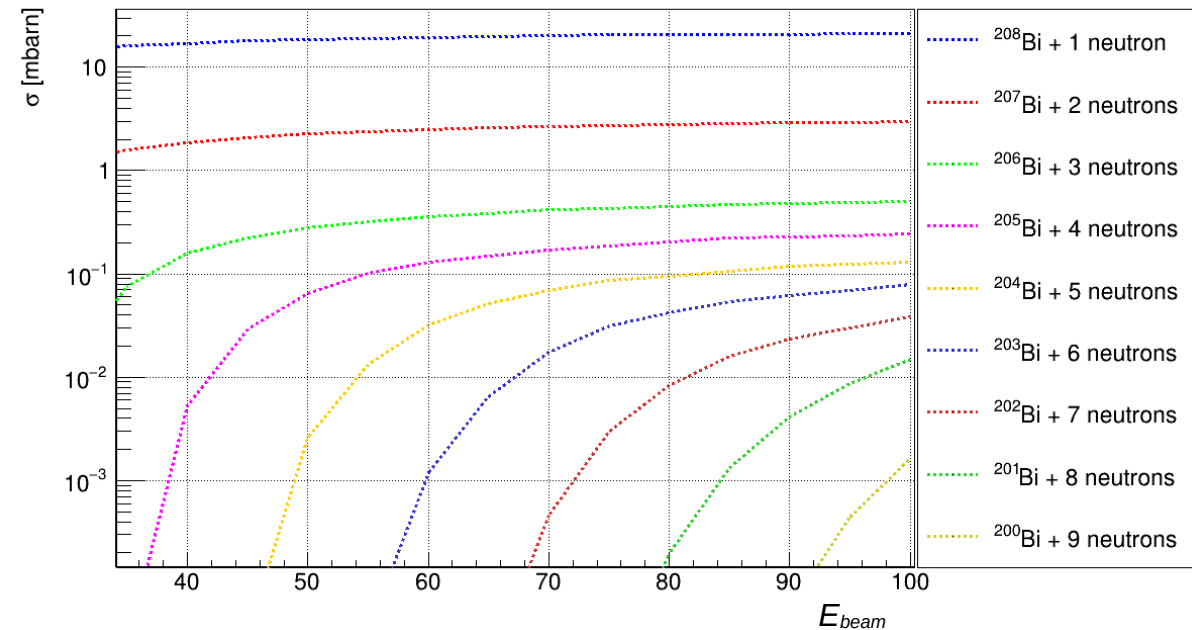
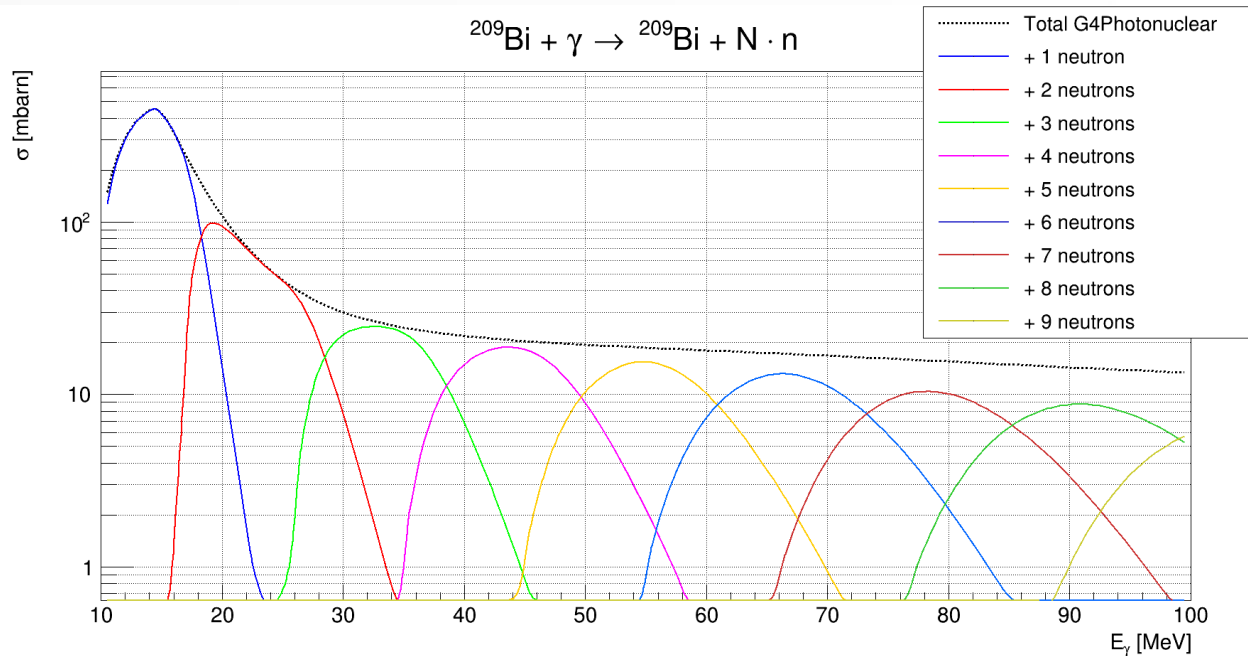


$$\sigma_{\text{abs}}(E_\gamma) = \sigma_{\text{GDR}}(E_\gamma) + \sigma_{\text{QD}}(E_\gamma),$$

$$\sigma_{\text{QD}}(E_\gamma) = L \frac{NZ}{A} \sigma_d(E_\gamma) f(E_\gamma),$$

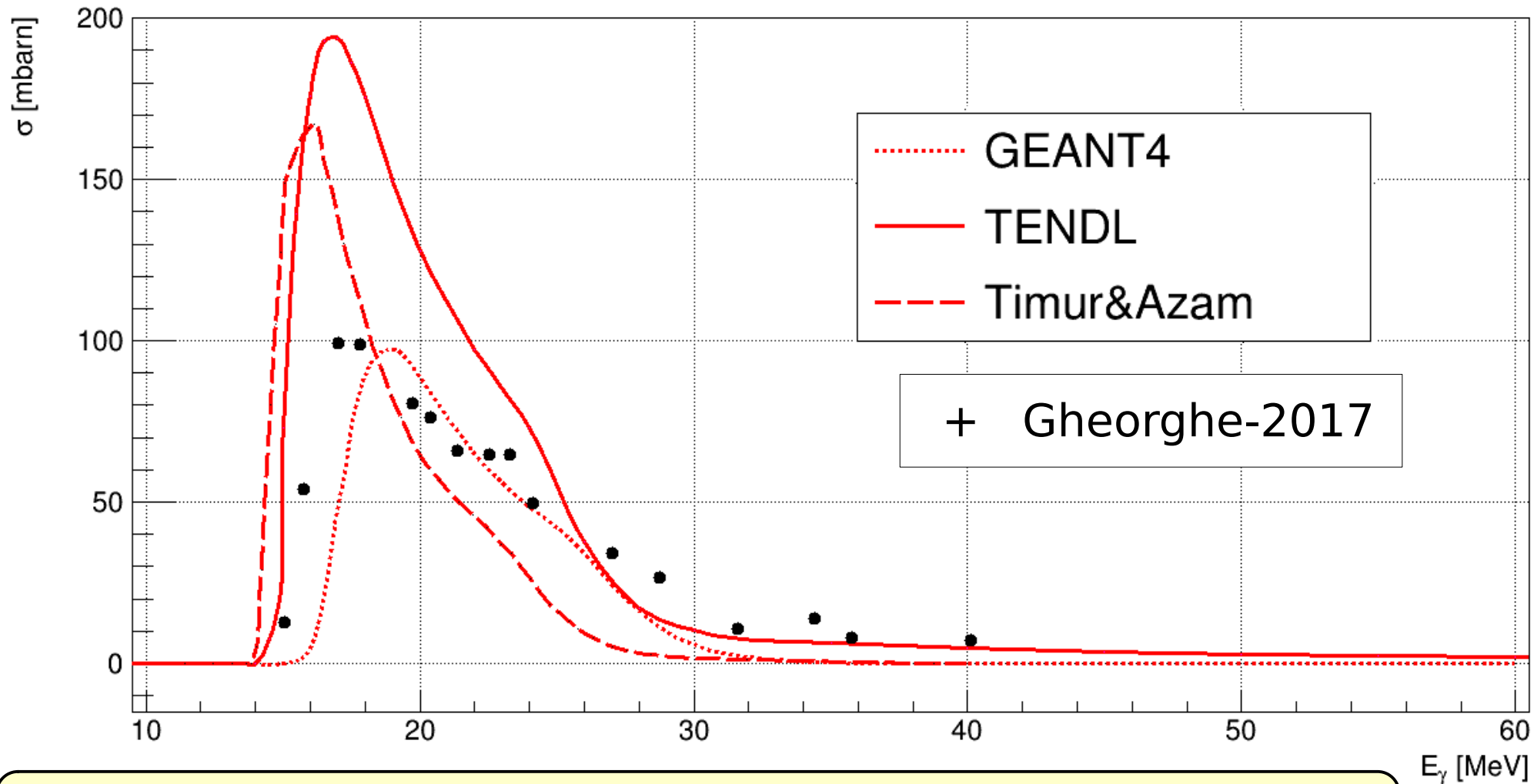
Levinger
Parameter:
 $L \sim 6.5$

Парциальные сечения фоторождения n нейтронов. Сечения, проинтегрированные по спектру тормозного излучения.



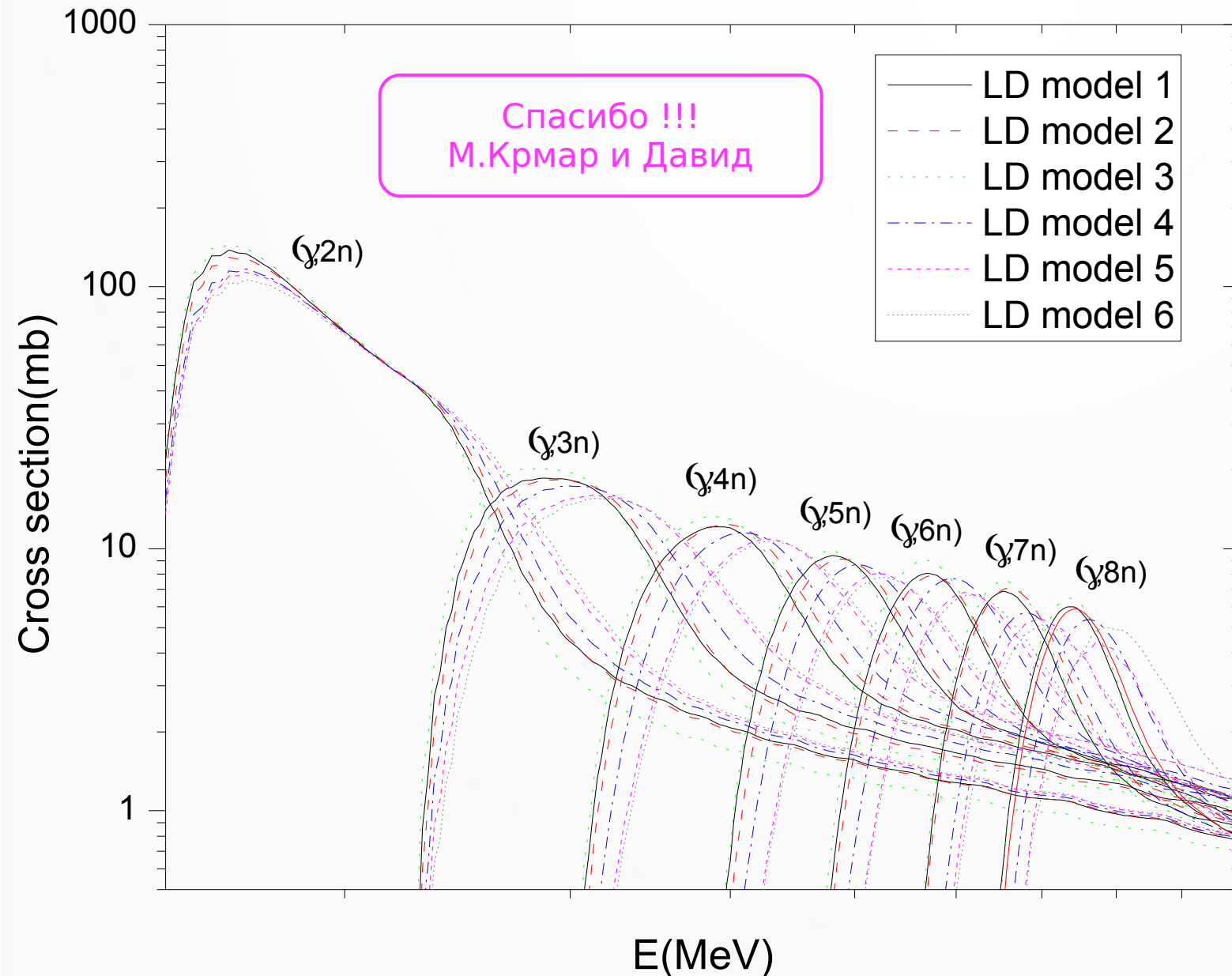
- Порог отделения 1 нуклона от ядра ~ 8 МэВ
- Полное сечение фотопоглощения состоит на 90-99% из вклада парциальных сечений фоторождения N нейтронов
- Вклад в пик ГДР дают в основном сечения $\text{Bi}+n$ и $\text{Bi}+2n$
- Конфигурации $p+Xn$, $2p+Xn$, $\alpha + Xn$ возможны, но маловероятны
- Начиная с ~ 80 МэВ заметный вклад вносит фото-фрагментация ядра (осколки)
- Выход (Yield) – сечение, проинтегрированное со спектром тормозного излучения, является монотонно возрастающей функцией от энергии пучка
- Висмут удобен тем, что дочерние изотопы $\text{Pb}(208-204)$ стабильны или малоактивны
- Измерение сечения $\text{Bi}-208$ активационным методом затруднено, $T_{1/2}=370$ тыс.лет

Парциальное сечение фоторождения нейтронов $\sigma(2\cdot n)$.



- Экспериментальные ошибки составляют 25-50 % в области [30, 40] МэВ
- Вблизи порога до 100%
- Для висмута-207 сечение G4 = LEND99 ближе всего к эксп. данным

Влияние выбора настроек TALYS на результат расчета парциального сечения фоторождения нейтронов



TALYS: Варианты моделей плотности уровней (LD)

- LD1: Constant temperature + Fermi gas
- LD2: Back-shifted Fermi gas
- LD3: Generalized superfluid model
- LD4: Microscopic LD, Goriely's tables
- LD5: Microscopic LD, Hilaire's tables
- LD6: LD5+Temperature dependent HFB

Актуальные экспериментальные данные о фоторождении нейтронов в висмуте

- Счет нейтронов, реакции (γ, n) и $(\gamma, 2n)$
 - Ускоренные позитроны, до 30МэВ, Harvey-1964 и др. 1960-1980
 - Сейчас рассматриваются как нуждающиеся в коррекции
- Тормозное излучение (Yield = CS folded with γ -spectrum)
 - Микротрон SINP MSU, 55.6 МэВ, Belyshev-2015
 - Микротрон SINP MSU, 67.7 МэВ, Ermakov-2010
 - Pohang Linac South Korea, 50-70МэВ, Naik-2011
 - ЛЯП, ЛИНАК-2020, 40-100 МэВ, Relative Yield ($Xn/3n$)
 - ЛЯП, ЛИНАК-2022, 35-60 МэВ, Relative Yield ($Xn/3n$)
- Обратный комптон, счет нейтронов (CS Unfolded)
 - NewSUBARU synchrotron radiation facility up to 40 MeV and ($4n$), Gheorghe-2017

Сравнение измерений относительных выходов N нейтронов $\sim Y(N \cdot n) / Y(Z \cdot n)$ для различных экспериментов

$$RY_N = Y_{Nn} / Y_{3n} = \frac{\int_{E_N}^{E_{beam}} \sigma_N(E_\gamma) \cdot \Phi(E_{beam}, E_\gamma) dE_\gamma}{\int_{E_3}^{E_{beam}} \sigma_3(E_\gamma) \cdot \Phi(E_{beam}, E_\gamma) dE_\gamma}$$

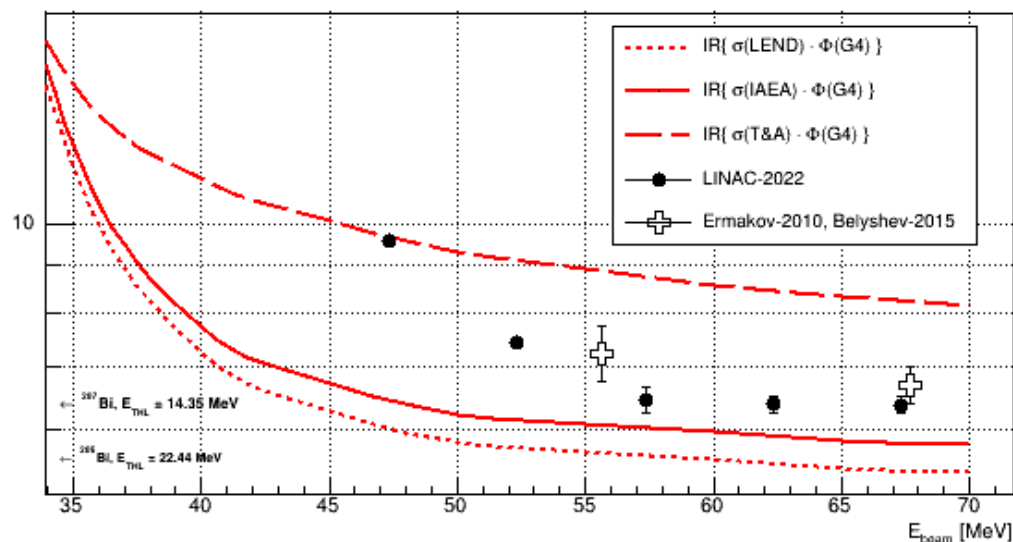
$$RY_{L,exp} = RY_{M,exp} \cdot \left(\frac{\int_{E_N}^{E_{beam}} \sigma_N(E_\gamma) \cdot \Phi_L(E_{beam}, E_\gamma) dE_\gamma}{\int_{E_3}^{E_{beam}} \sigma_3(E_\gamma) \cdot \Phi_L(E_{beam}, E_\gamma) dE_\gamma} \right) \cdot \left(\frac{\int_{E_N}^{E_{beam}} \sigma_N(E_\gamma) \cdot \Phi_M(E_{beam}, E_\gamma) dE_\gamma}{\int_{E_3}^{E_{beam}} \sigma_3(E_\gamma) \cdot \Phi_M(E_{beam}, E_\gamma) dE_\gamma} \right)^{-1}$$

- Экспериментальное отношение выходов не зависит от погрешностей измерения тока и абсолютной эффективности спектрометра
- Кривая относительной эффективности должна быть измерена (Vi-206)
- Теоретическое отношение выходов модельно зависимо
- Разные эксперименты имеют отличающуюся геометрию, как следствие и разные потоки тормозного излучения. При сравнении результатов необходимо моделирование потоков для обеих экспериментальных конфигураций
- В коэффициенты пересчета входит сечение, поэтому они также модельно зависимы

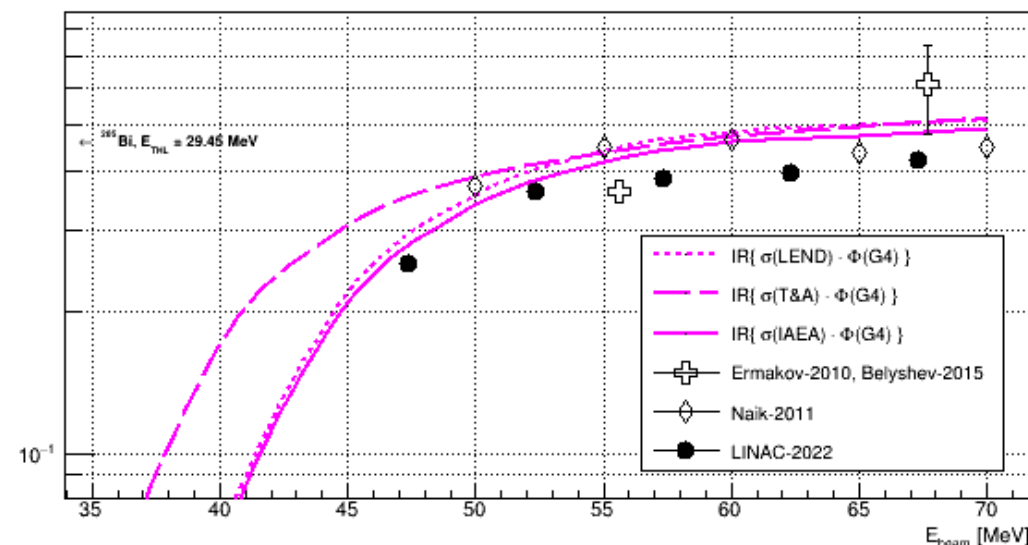
Измеренный относительный выход N нейтронов $\Upsilon(N \cdot n) / \Upsilon(3 \cdot n)$

Сдвиг энергии пучка ЛИНАК 7.35 +/- 0.65 МэВ

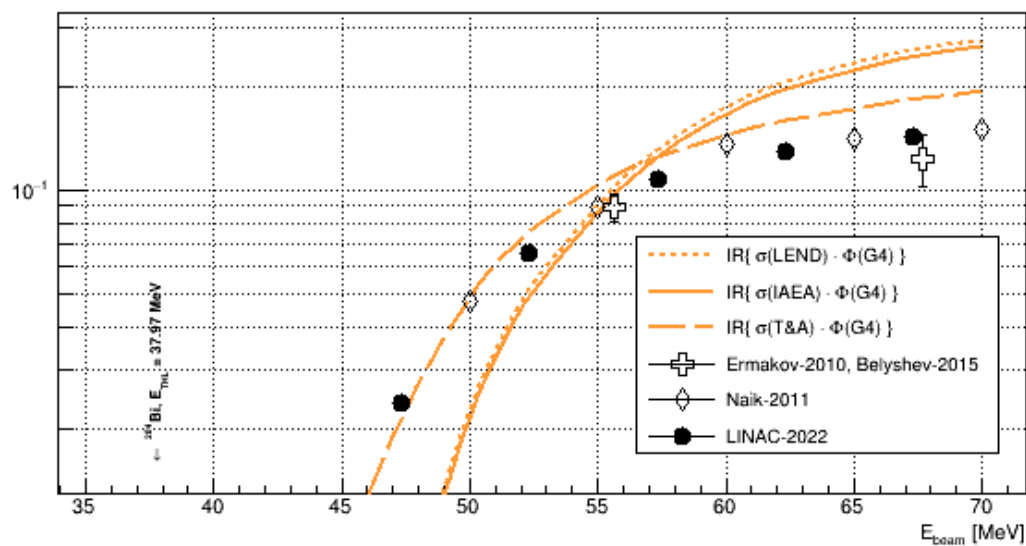
$RY({}^{209}\text{Bi}(\gamma,2n) {}^{207}\text{Bi})$



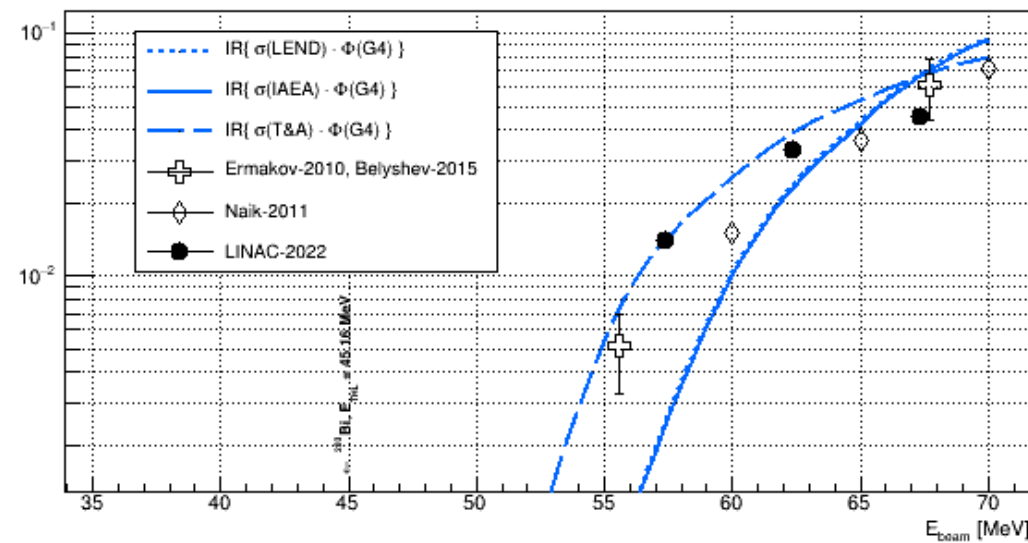
$RY({}^{209}\text{Bi}(\gamma,4n) {}^{205}\text{Bi})$



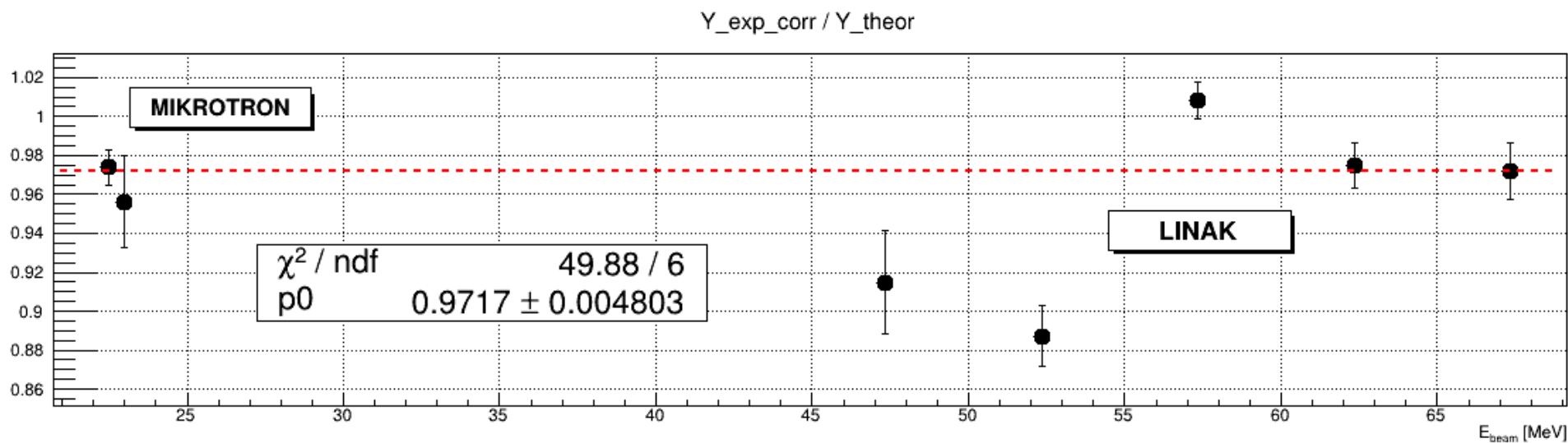
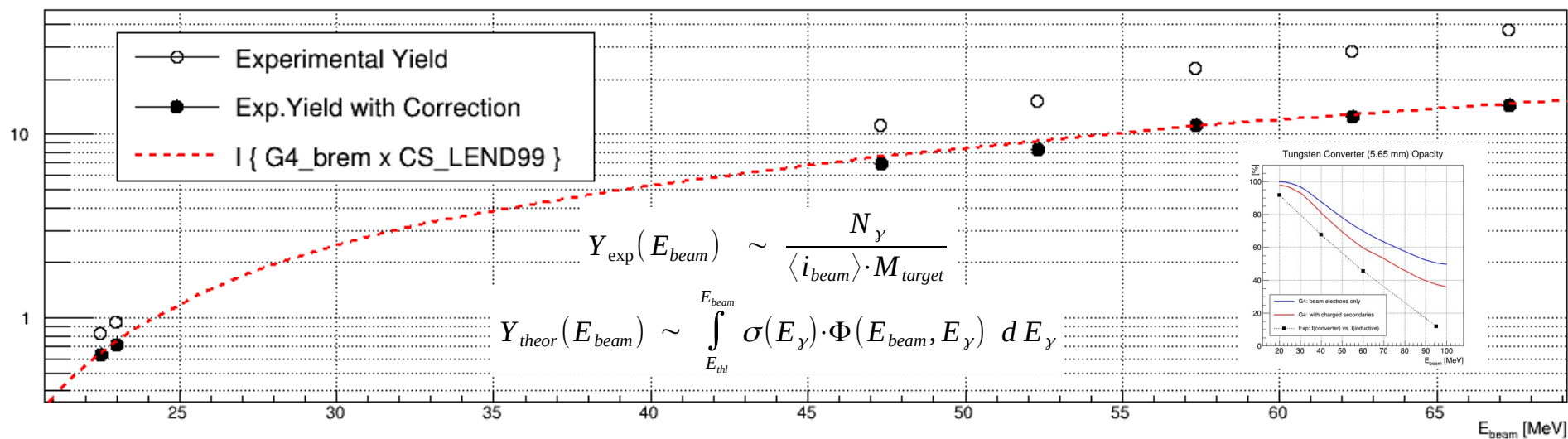
$RY({}^{209}\text{Bi}(\gamma,5n) {}^{204}\text{Bi})$



$RY({}^{209}\text{Bi}(\gamma,6n) {}^{203}\text{Bi})$

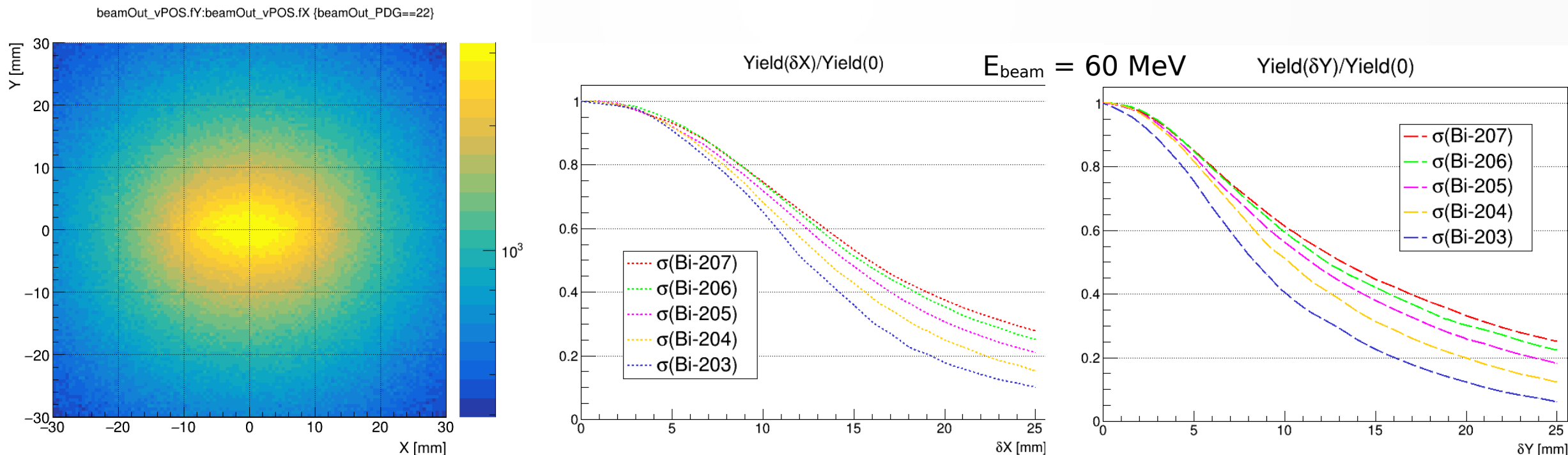


Выход реакции $\Upsilon(2n)$, измеренный по активности изотопа Bi-207 Эффект прозрачности конвертера для пучковых электронов



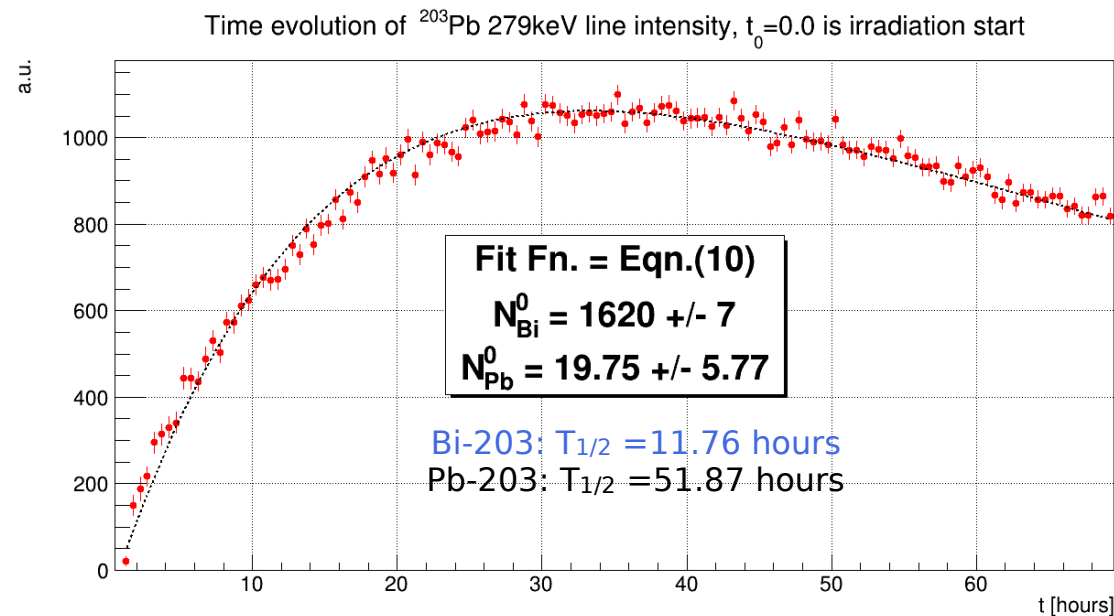
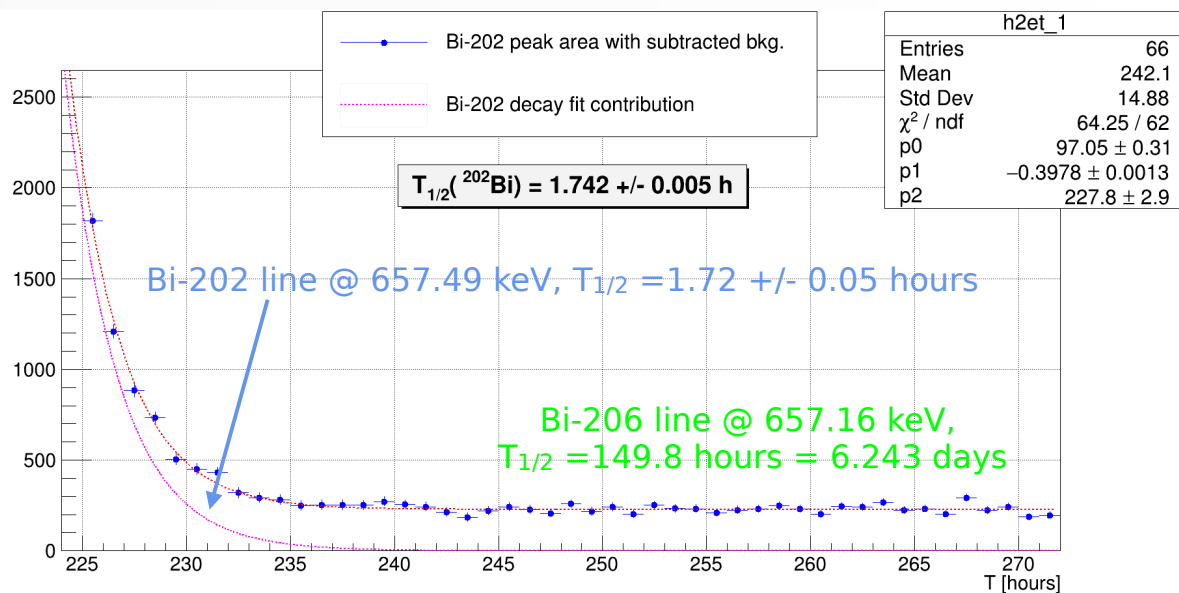
- Spectral Lines [keV]
569.702 (205)
1063.662
~~1770.237 (LO)~~
- Microtron flux is corrected to LINAC conditions by G4 simulation
- LINAC yields are normalized to corrected Microtron yields
- Inductive sensor was used at to verify W-radiator opacity

GEANT4 моделирование влияния смещения пучка на выходы $Y(X \cdot n)$



- Поперечный размер пучка 20x2 мм, размер W-конвертера 50x50 мм
- Поперечное смещение пучка позволяет объяснить $Y_{\text{exp}}/Y_{\text{theor}} < 1$, причем масштаб эффекта разный для относительных выходов изотопов: например $dY = 10 \text{ мм}$ дает изменение $\sim 20\%$ для $Y(\text{Bi-203})/Y(\text{Bi-206})$
- Для учета вклада смещения пучка должен работать мониторинг поперечных сдвигов

Наблюдение распада изотопов Bi-202 и Pb-203, соответствующих реакциям $7n$ и $p+6n$



Изотоп Bi-201 не был наблюден на макс. энергии в 67.35 МэВ (порог 61.4 МэВ)

Итоги:

- Образцы висмута облучили на энергиях 35-60 MeV на выводе пучка 200 MeV LINAC. По результатам измерений относительных выходов актуальная энергия на выводе пучка должна быть скорректирована на ~ 7.35 MeV
 - Запланированное измерение на энергии 35 МэВ не удалось, ускоритель работал нестабильно
- Облученные образцы были измерены на германиевом спектрометре НЭОЯСРХ
 - В том числе в низкофоновой конфигурации со свинцовым домиком (с ноября 2022)
 - Измерения повторены в 2023 году для набора большей статистики по изотопу Bi-207
 - Были наблюдаемы изотопы Bi-202 и Pb-203
 - Изотоп Bi-201 не был наблюден на макс. энергии в 67.35 МэВ (порог 61.4 МэВ)
- Сделано моделирование в GEANT4 спектров тормозного излучения на W-конвертере для геометрии облучения LINAK-200
- Для сравнения с результатами других экспериментов было проведено GEANT4 моделирование (и вычислены коэффициенты пересчета) для геометрии облучения
 - Микротрон ЛЯР (20-23 МэВ)
 - Микротрон МГУ (56, 68 МэВ)
 - Ускоритель в POHANG, Южная Корея (50 - 70 МэВ)
- Измеренные относительные выходы удовлетворительно согласуются с другими эксп. данными
- Для надежного измерения абсолютных и относительных выходов необходимы:
 - Мониторинг положения пучка во время облучения
 - Дополнительное измерение тока на выводе пучка индукционным датчиком
 - Калибровка энергии выведенного пучка в одноэлектронном режиме

Спасибо за внимание !



+



=

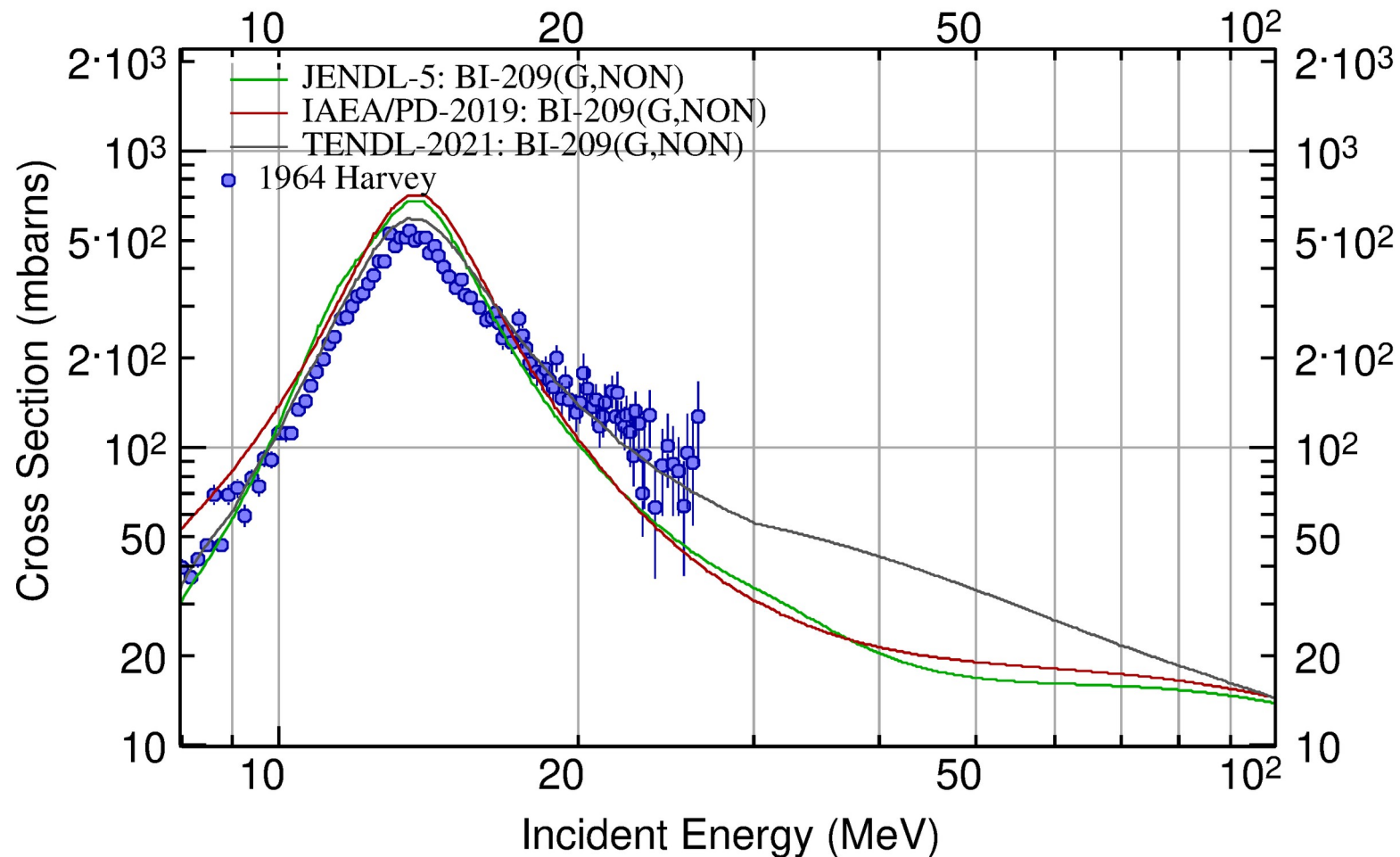


Backup Slides

Полное сечение фотопоглощения атомными ядрами

Evaluated Nuclear Databases

<https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm>



EXFOR

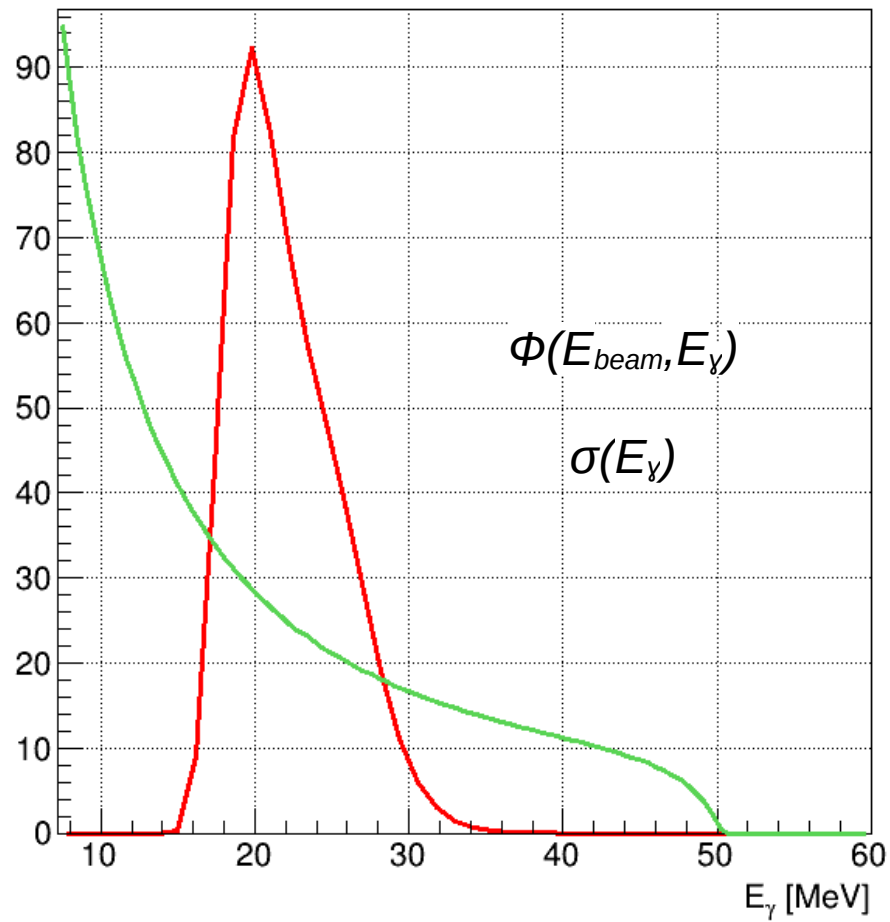
Experimental Nuclear Reaction Data

- Photonuclear CS measurements
- Partial Photonuclear CS (various final states)
- Bremsstrahlung Integrated Partial CS (Yield)
- Relative BS Integrated Partial CS (Rel.Yield)
- BS Flux-Averaged Partial CS
- Integrated Partial CS per eq. photon

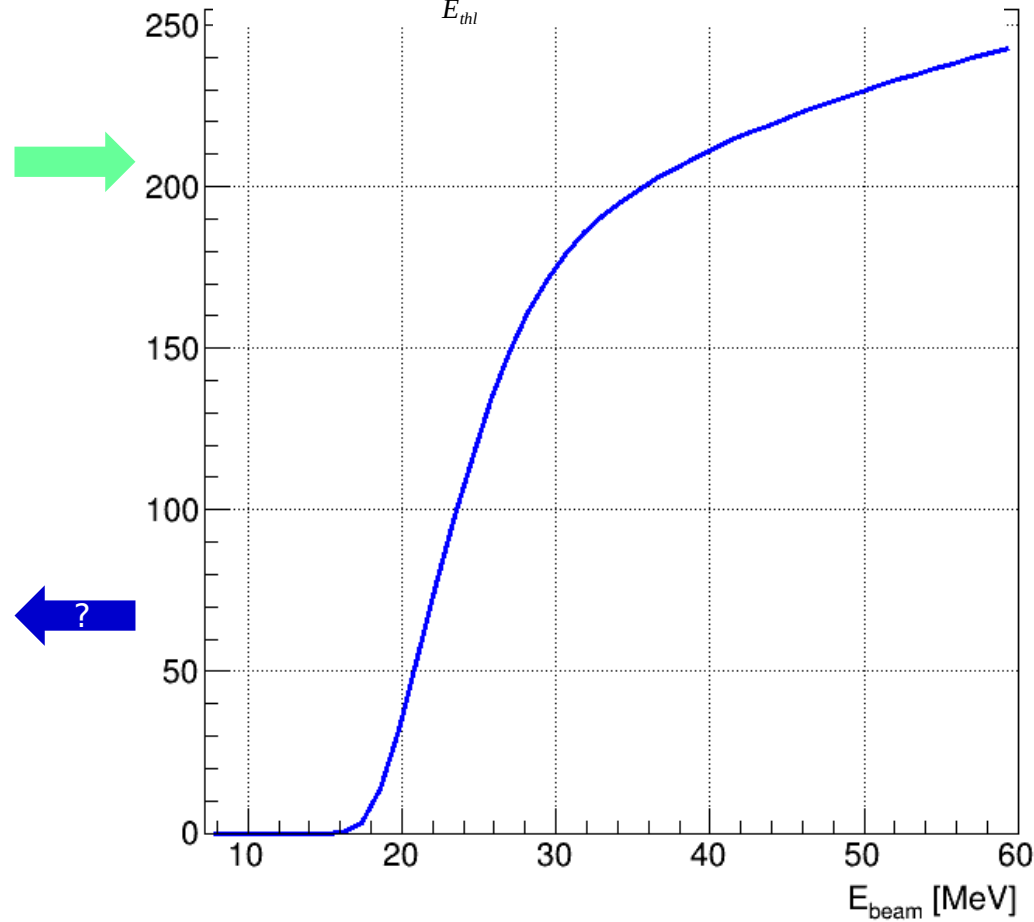
Парциальное сечение фоторождения нейтронов $\sigma(2\cdot n)$.



fCS

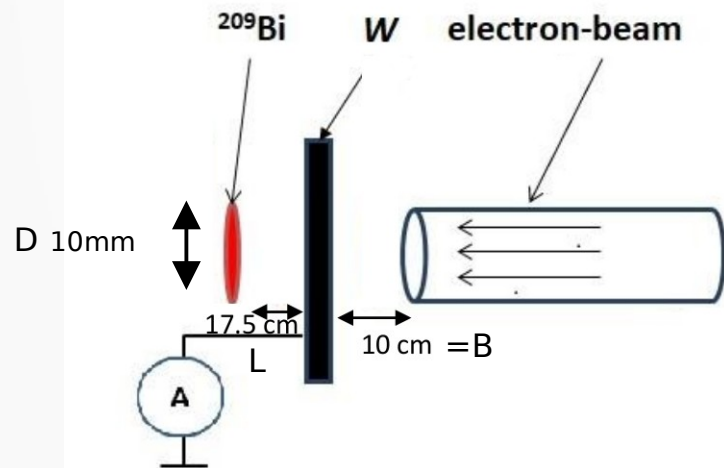


$$Y(E_{beam}) = \int_{E_{th}}^{E_{beam}} \sigma(E_\gamma) \cdot \Phi(E_{beam}, E_\gamma) dE_\gamma$$



- Обратная задача решается, но математически неустойчива
- Метод квазимонохроматизации необходимо корректно применять, подробнее на следующем семинаре

Конфигурация облучения в различных экспериментах и моделирование спектра тормозного излучения (GEANT4)



Schiff Formula,
valid for:
1. Thin converter
2. $\theta = 4\pi$

Schiff Formula:
with corrections
1. Thick converter
2. $\theta = 4\pi$

- Forward Brems: boosts spectrum tail
- Thick Converter: filters out spectrum tail

LINAK:

$W=5.65\text{ mm}$
 $L=175\text{ mm}$
 $D=10.5\text{ mm}$

1. Thick converter
2. $\theta \sim 0.03\text{ rad}$

Naik(2011):

$W=0.1\text{ mm}$
 $L=120\text{ mm}$
 $D \times D = 14.1\text{ mm}$

1. Thin converter
2. $\theta \sim 0.06\text{ rad}$

Microtron MSU:

$W=2.10\text{ mm}$
 $L=0\text{ mm}$
 $D=50\text{ mm}$

1. Thick converter
2. $\theta \sim 2\pi$

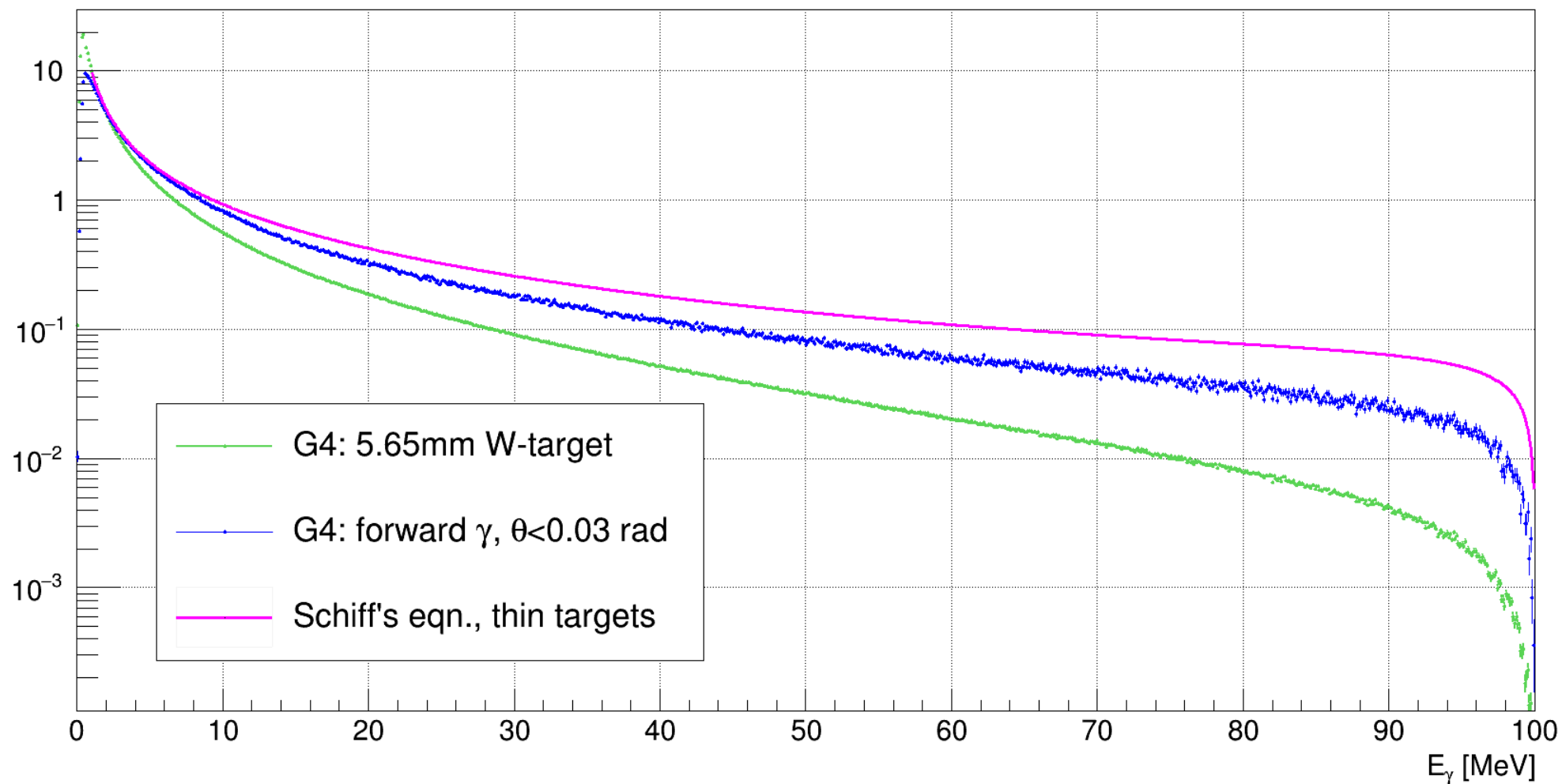
Gheorghe-2017

Synchrotron
Source

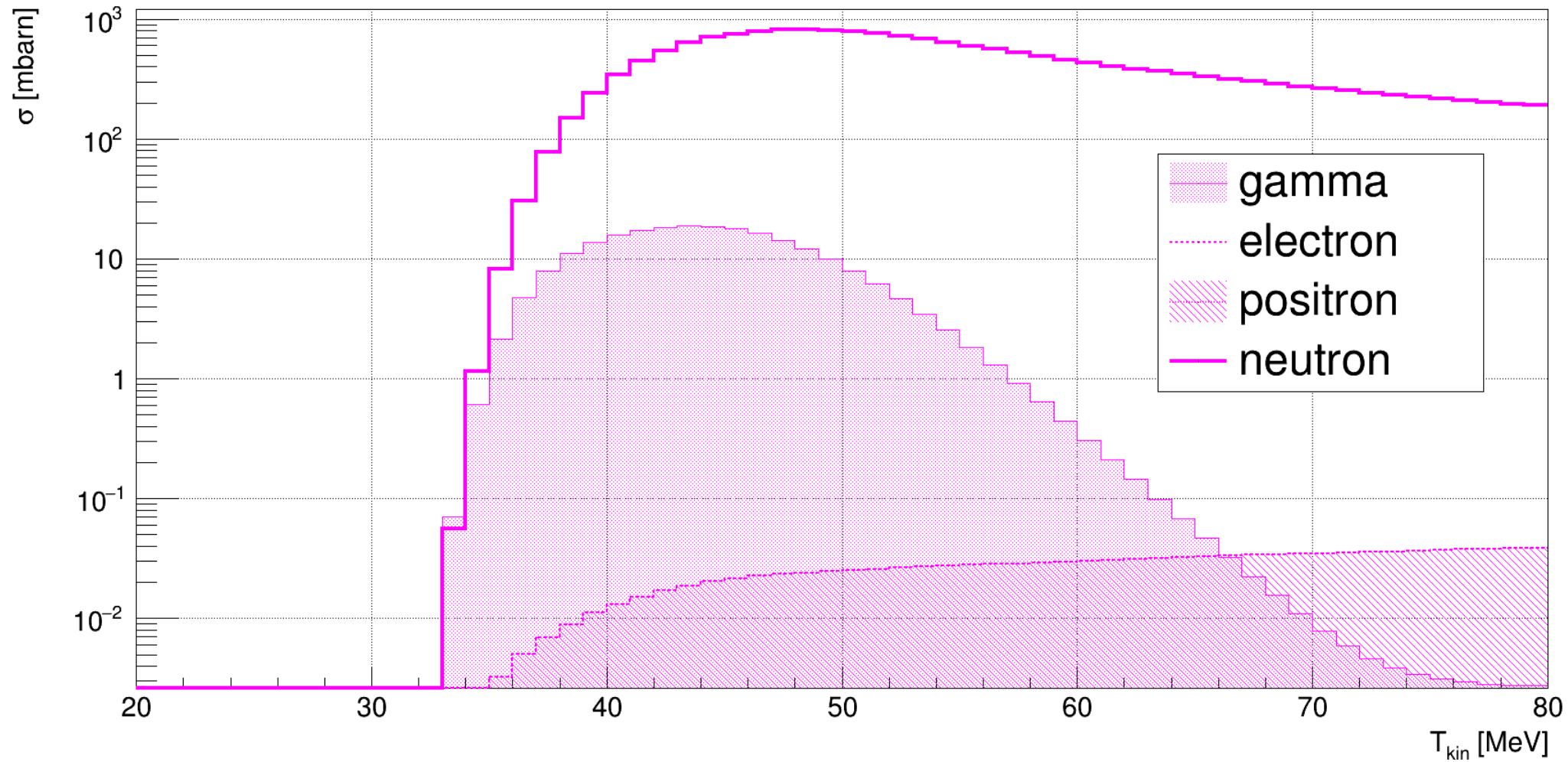
“monoenergetic”

Моделирование потоков гамма-квантов от взаимодействия пучка электронов с конвертером (GEANT4) (2)

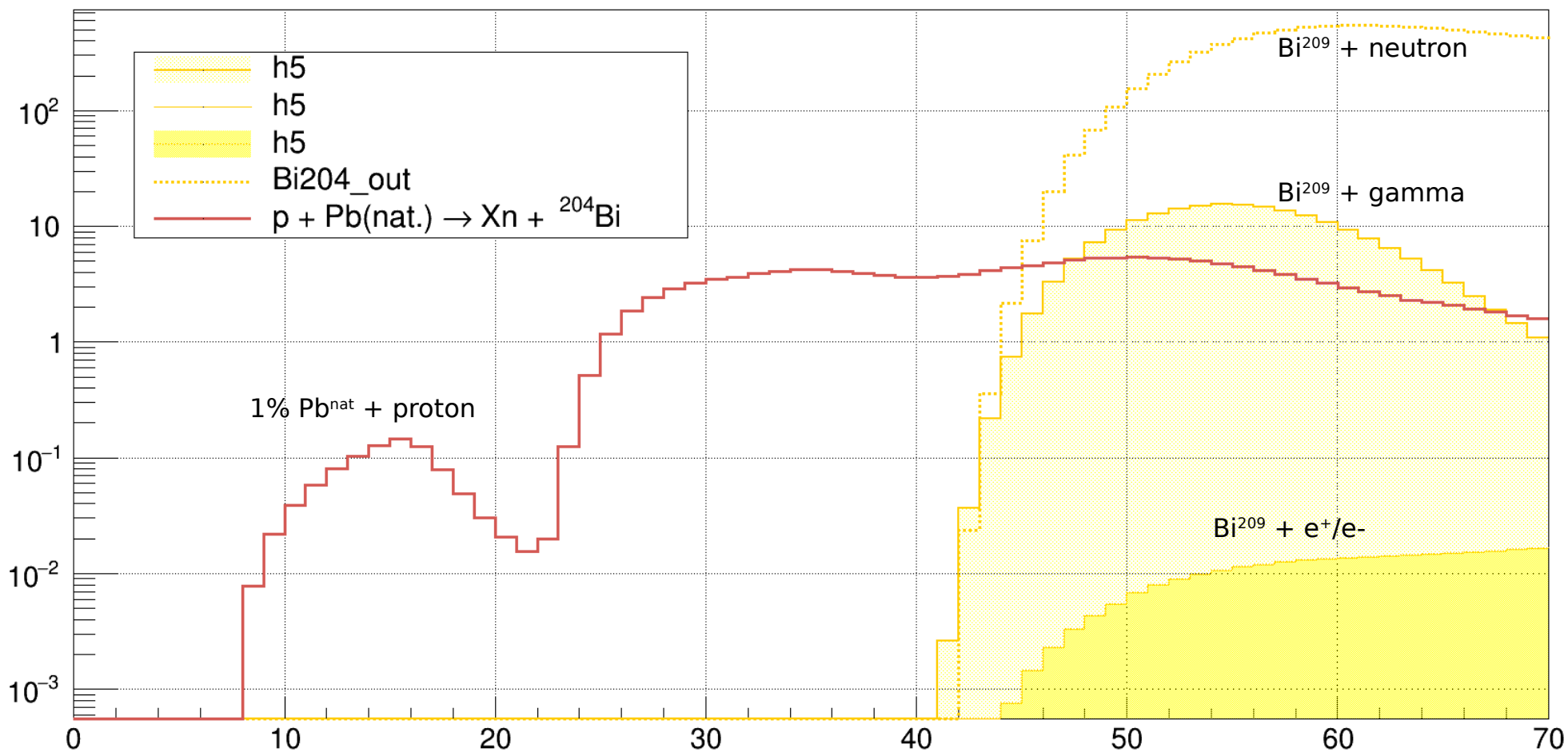
G4Sim for thick 5.65mm tungsten radiator and 100 MeV e^- beam



Сечение (GEANT4) рождения Bi-205

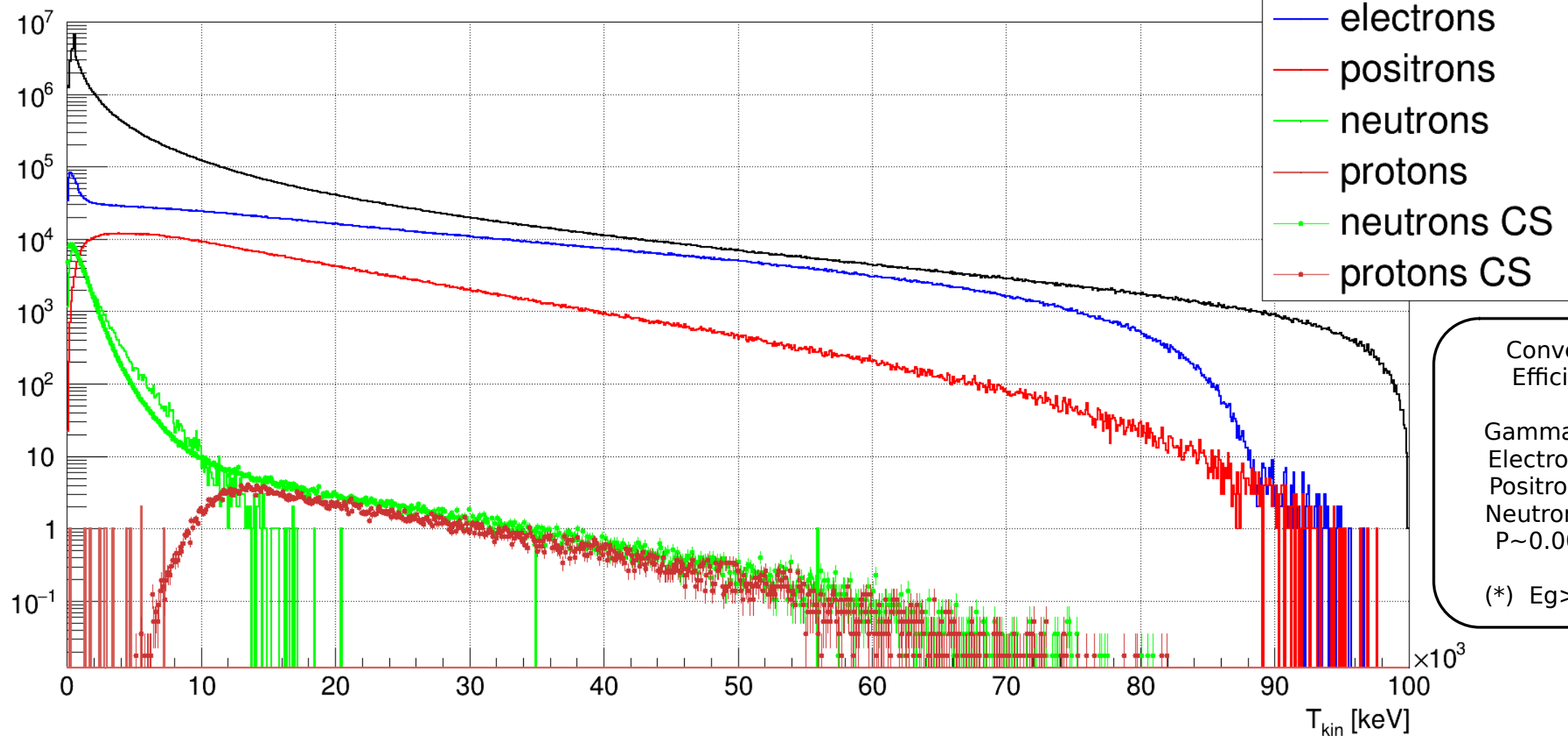


Сечение (GEANT4) рождения Bi-204 в мишени, содержащей 1% природного свинца

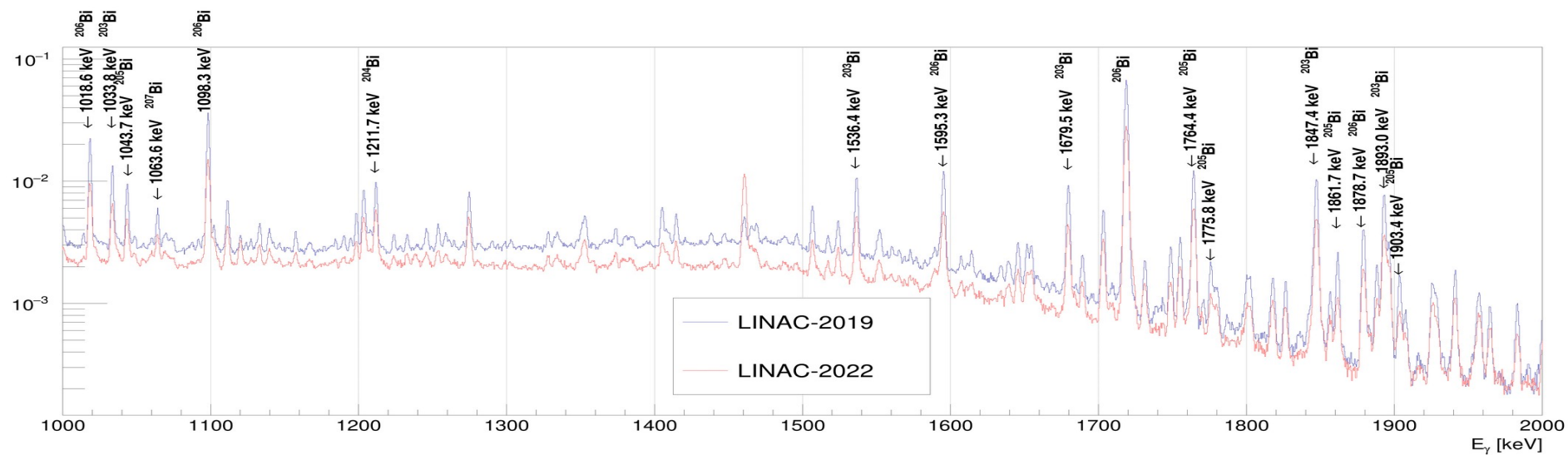
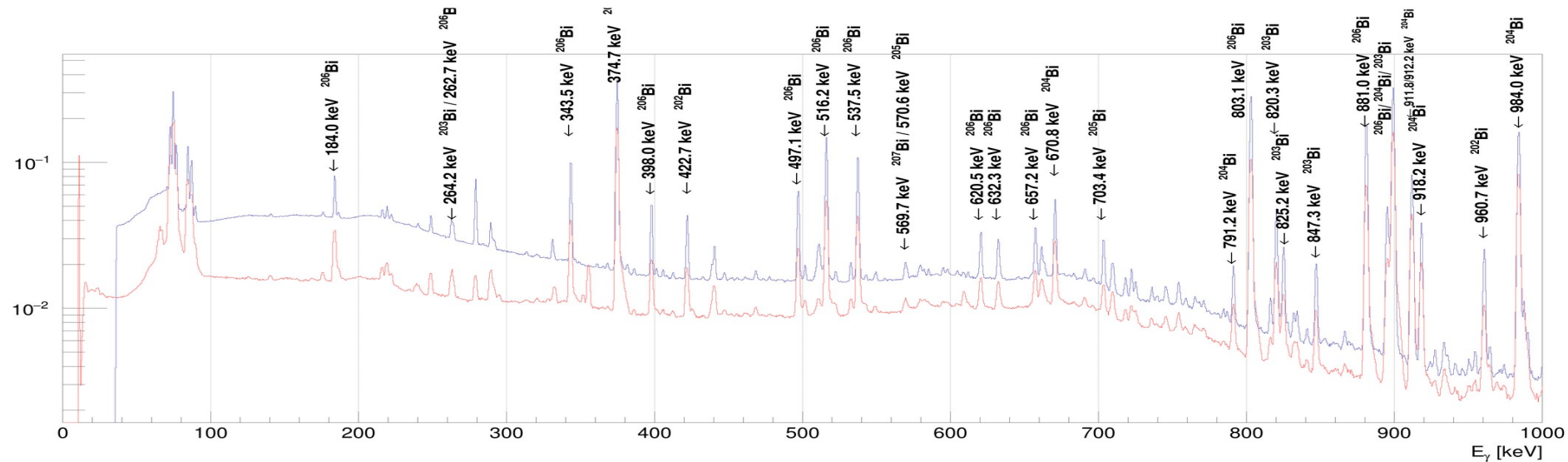


Моделирование потоков частиц от взаимодействия пучка электронов с конвертером (GEANT4)

G4Sim: 10M beam electrons @ 5.65mm W target



Пример измеренных спектров облучённых образцов природного Вi

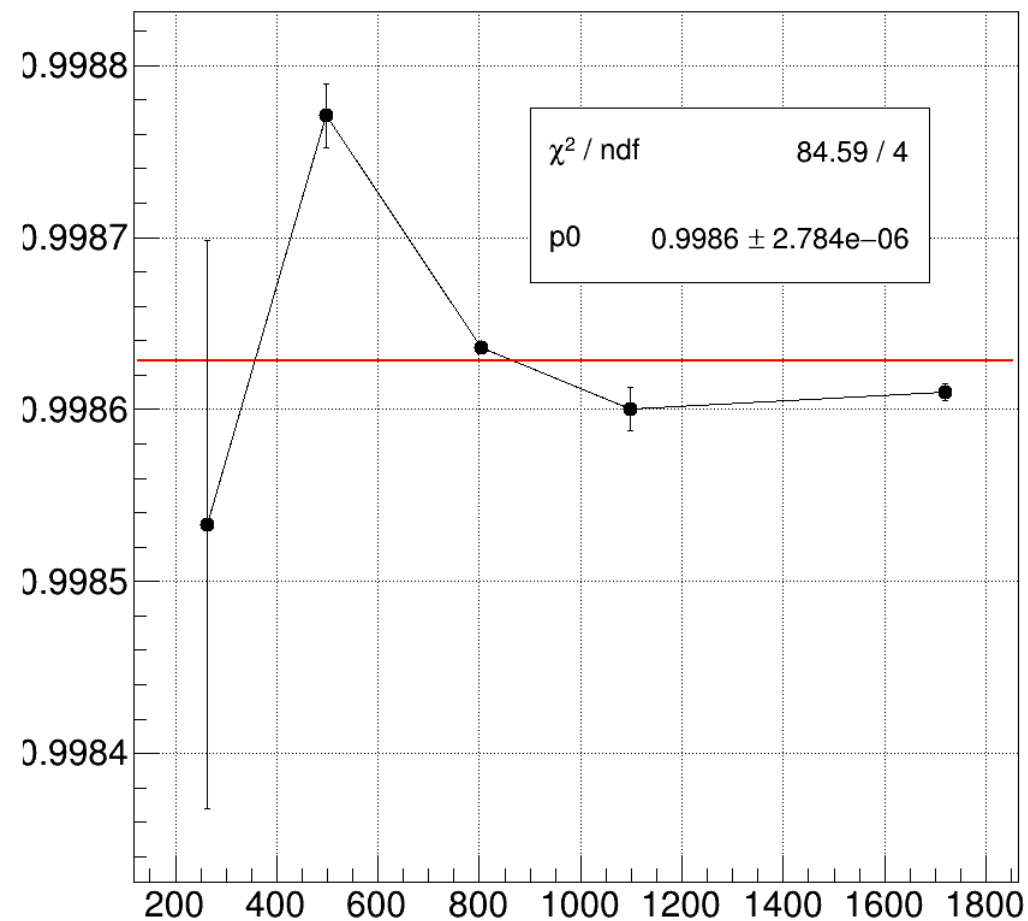


2022:

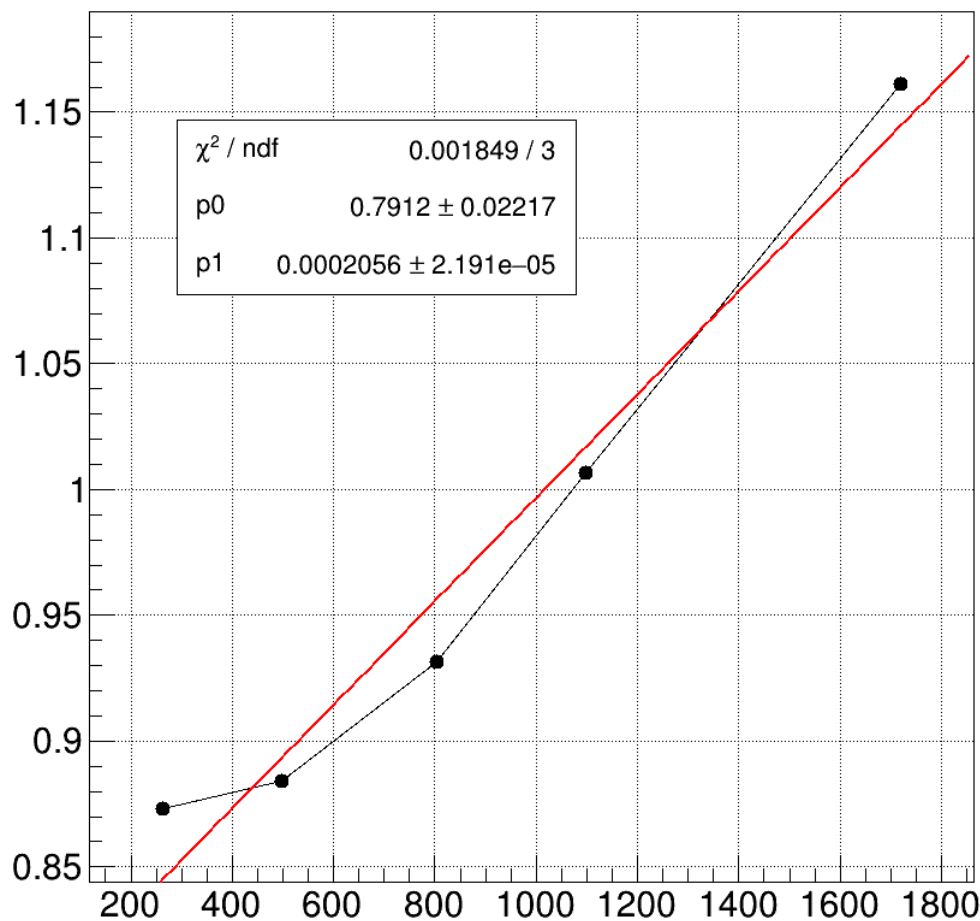
- 5 Bi Samples for beam energies 40-60 MeV
- Several detector measurements per sample
- Isotopes from Bi-207 to Bi-201 are studied
- Additional low-bkg measurements for Bi-207
- 2 background-only runs
- Multiple spectral lines per measurement
- Each line is fitted with gaussian + linear bkg., Option: 2*gauss + linear
- FLUKA detector+sample model for 2 sample sizes
- GEANT4 forward bremsstrahlung simulation

Пример калибровки шкалы детектора по энергии и определения зависимости разрешения детектора от энергии

Energy Calibration

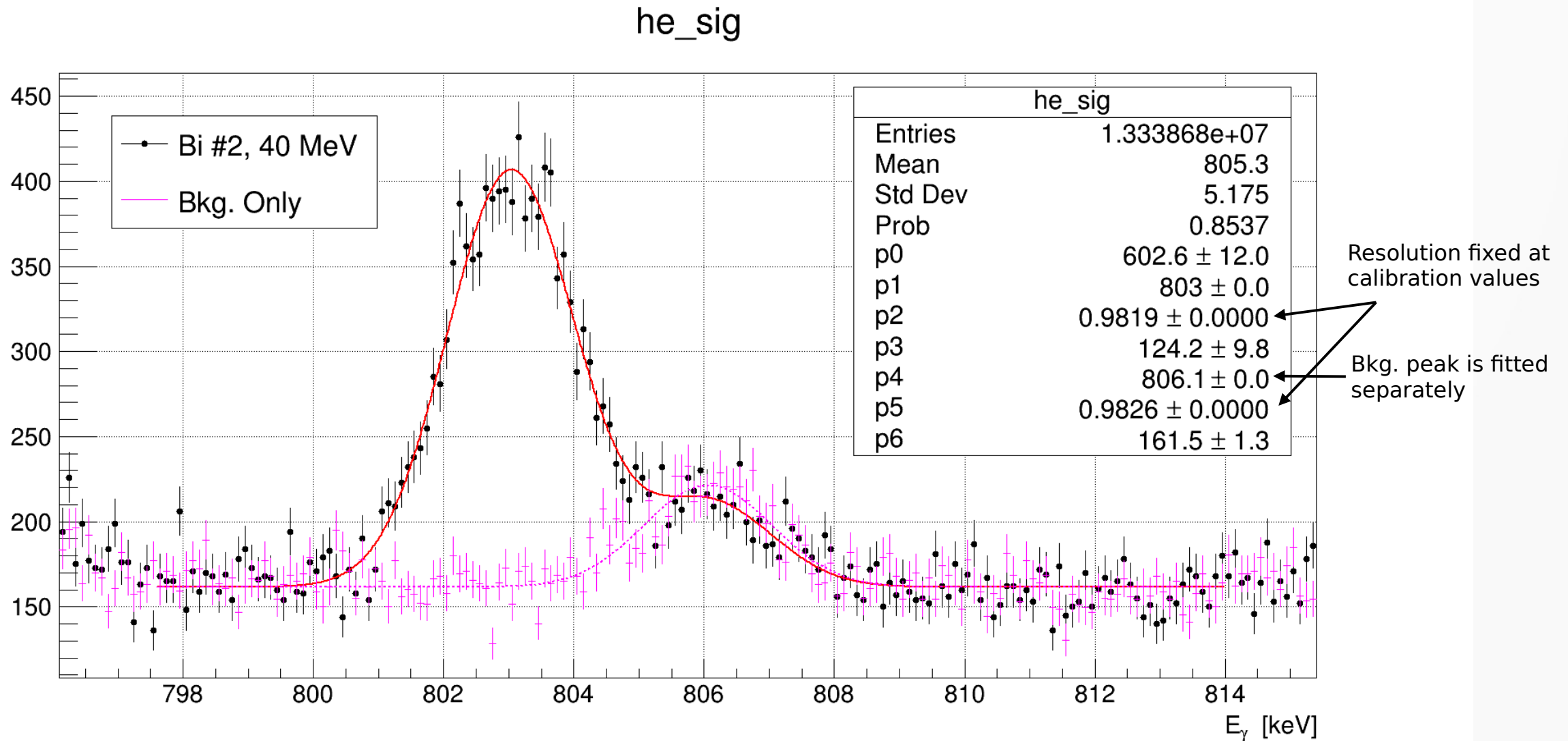


Energy Resolution

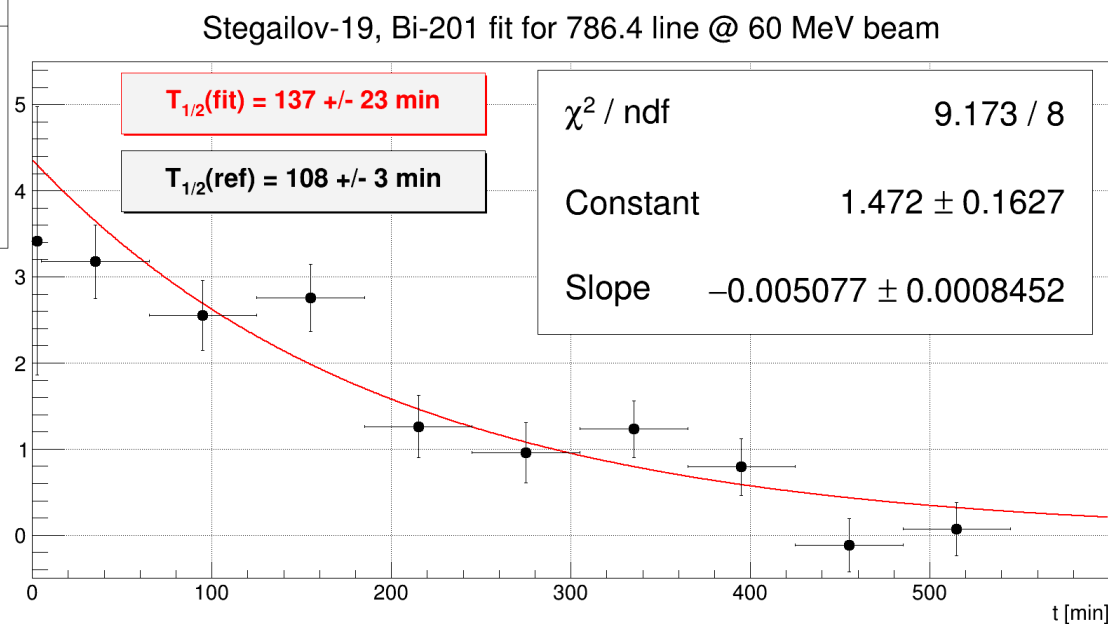
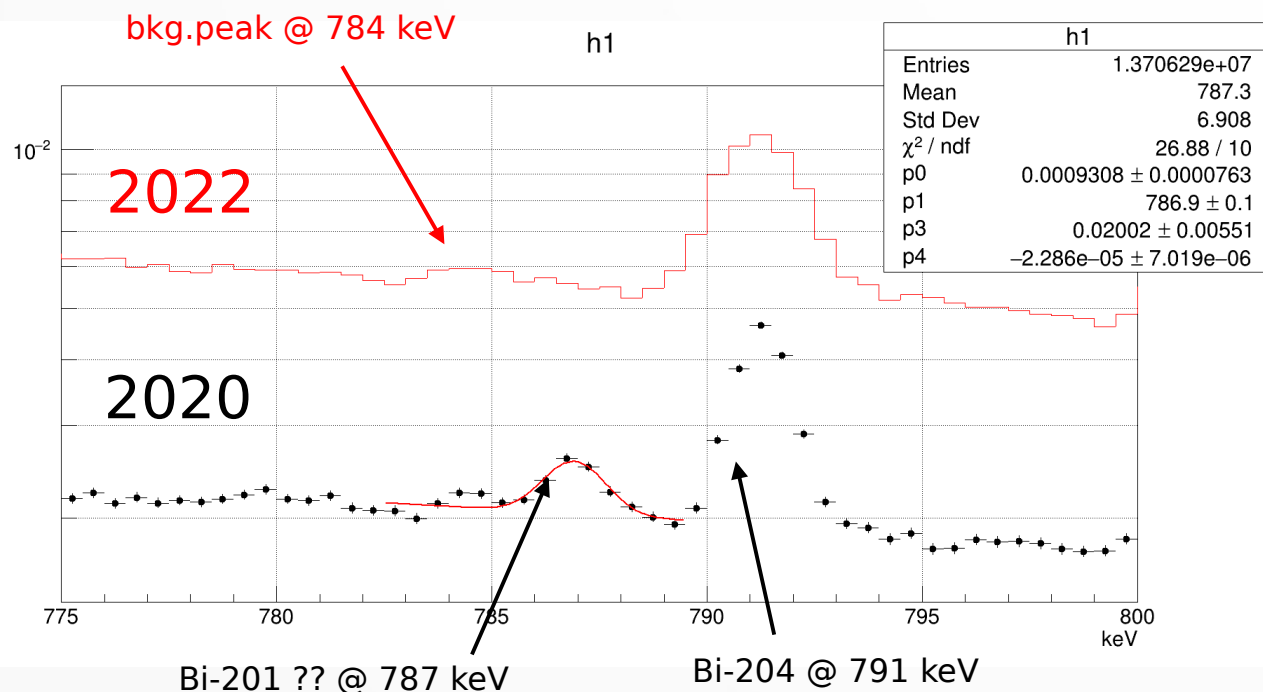


- Background only data is energy corrected by bkg.peaks in signal data
- Background peak widths are also used in final energy resolution estimation

Пример фитирования спектральной линии 803.1 keV изотопа Bi-206 вблизи известного фонового пика (DATA)



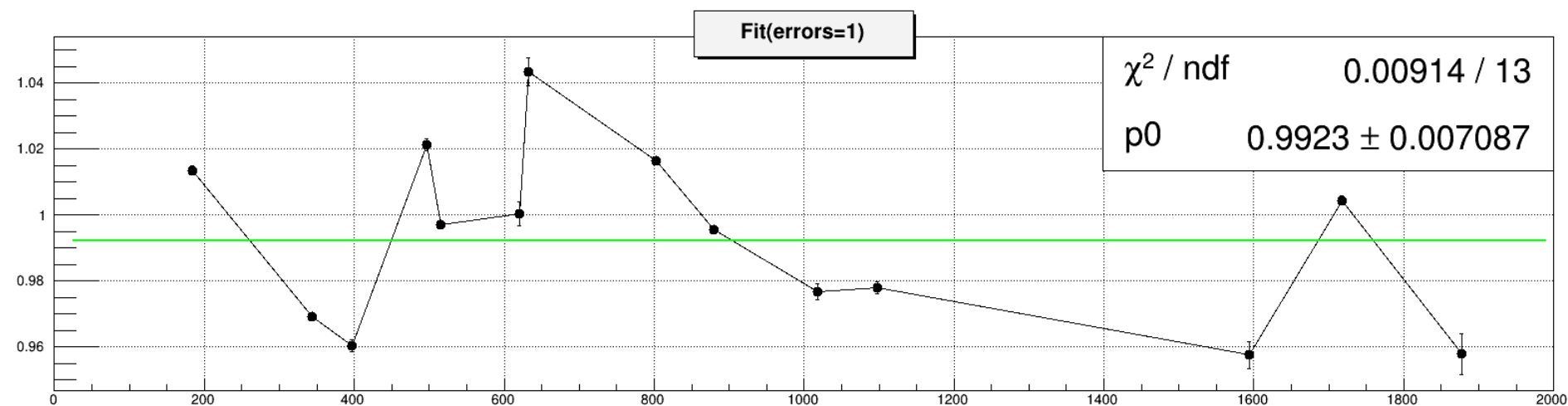
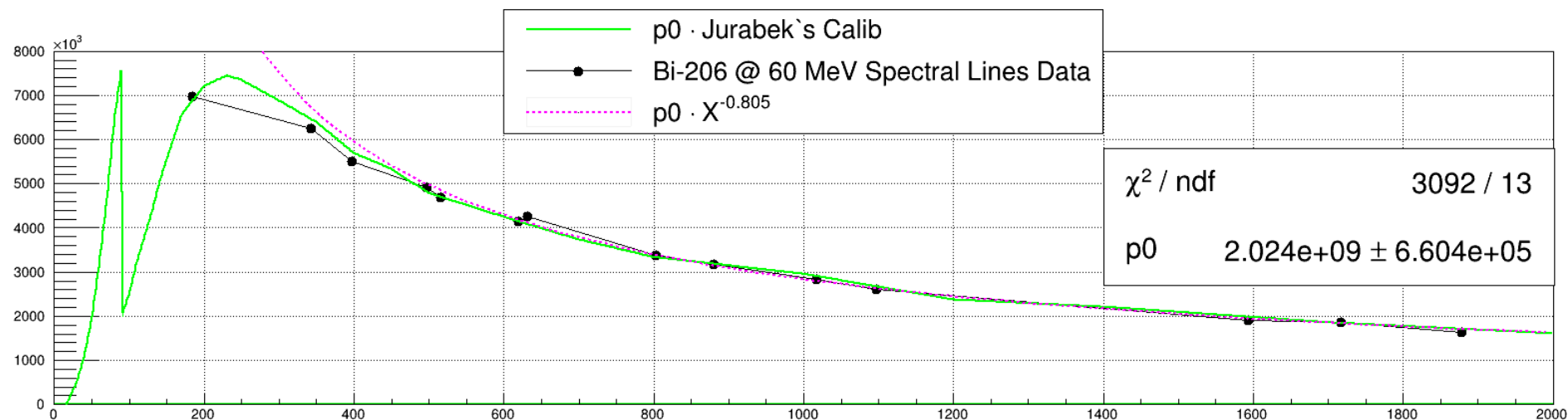
Фитирование спектральной линии 787 keV, предположительно Bi-201, и определение периода полураспада



Bi-201 has 6 more spectral lines with $I_g > 5\%$, all of them masked by close peaks
 Last line @ 1651 keV has $T_{1/2} \sim 10\text{h}$, compatible with Bi-203 or Bi-204
 !! Bi-202 has $T_{1/2} \sim 103.1 \text{ min} = 1.72 \text{ hour} !!$
 Also Bi-202 has spectral line at 787 keV with unspecified I_g

No Bi-201 in 2022 data ... but some weak evidence in 2020 data

Пример определения относительной эффективности детектора по линиям изотопа Bi-206 на энергии 60 МэВ

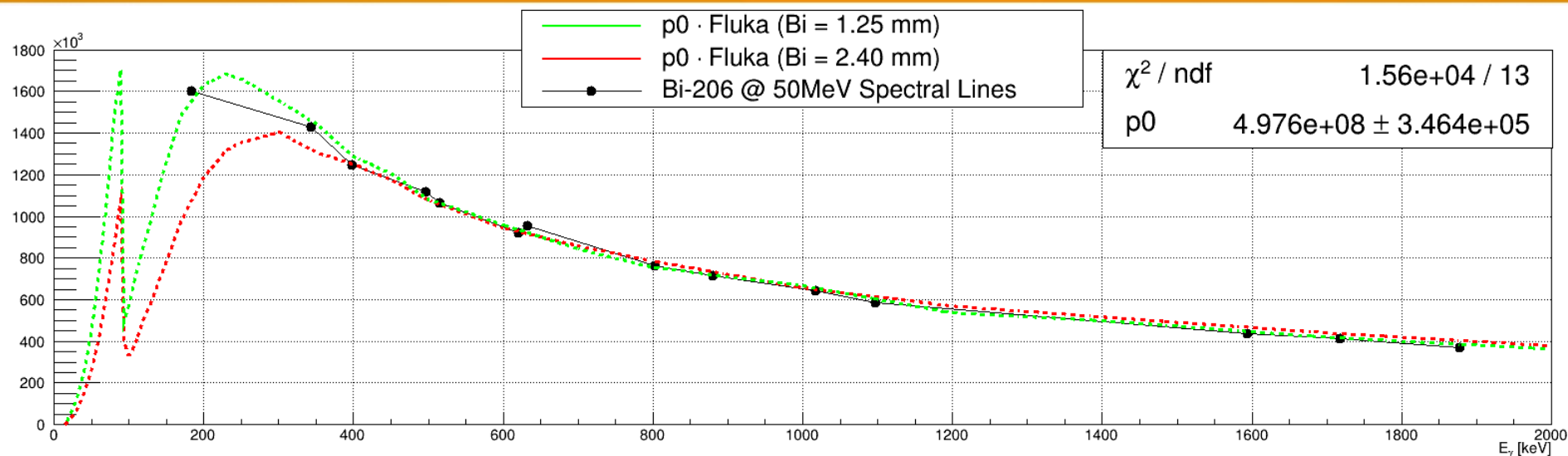


Spectral Lines
for Bi-206
Calibration:
[keV]

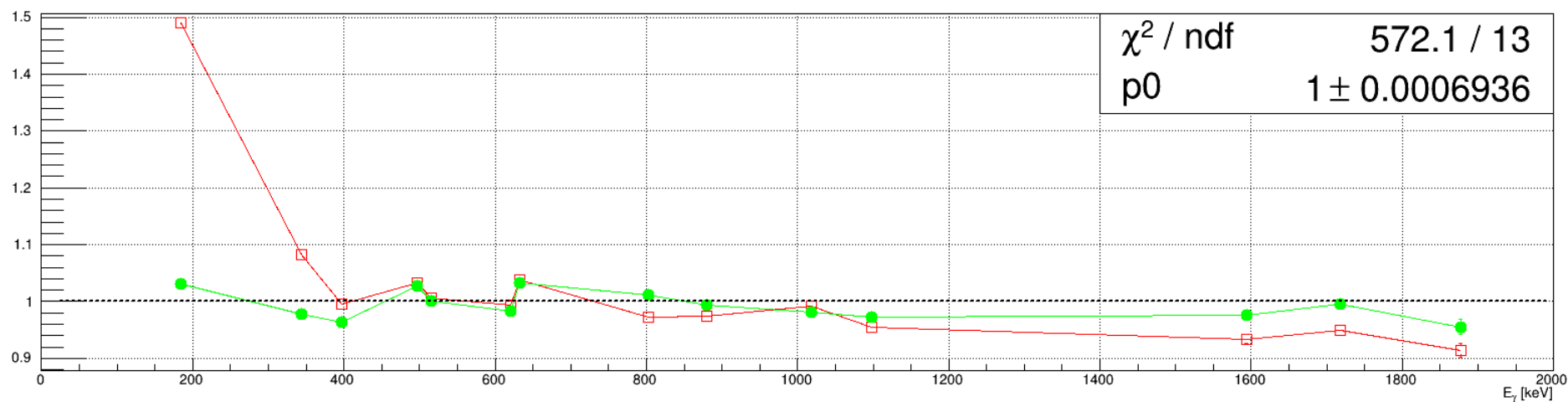
- 183.98
- ~~262.70 (203)~~
- 343.51
- 398.00
- 497.06
- 516.18
- 620.48
- 657.16(202)
- 803.10
- 881.01
- ~~895.12 (204)~~
- 1018.63
- 1098.26
- 1595.27
- 1718.70
- 1878.65

Fluka Simulation of 1.25 mm thick Bi target @ 100mm from Detector, (60, 55 MeV = 1.0mm)

Пример определения относительной эффективности детектора по линиям изотопа Bi-206 на энергии 50 МэВ



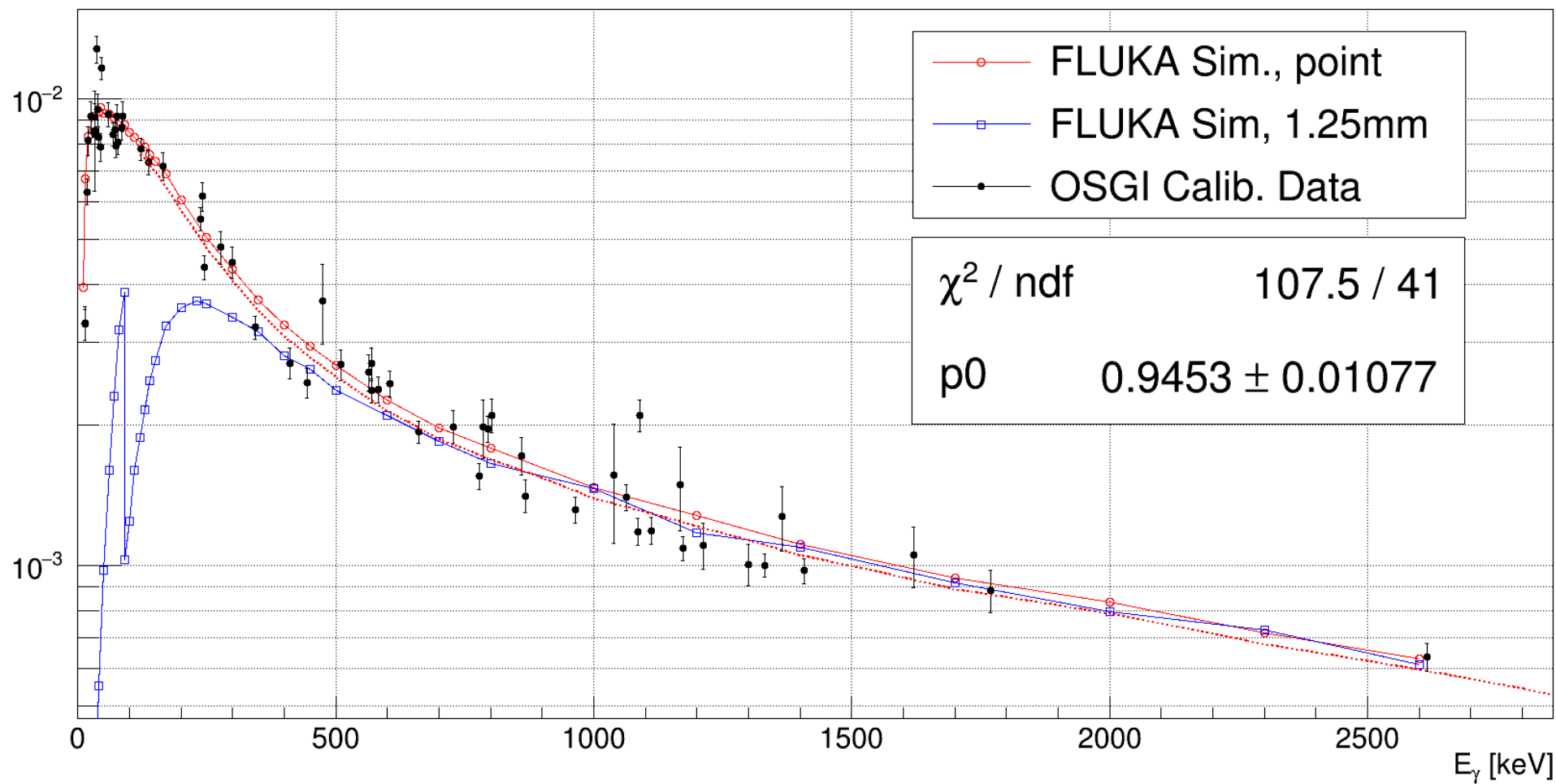
Sample Thickness [#:MeV:mm]		
#2	40	1.5
#3	45	2.5
#4	50	2.4
#10	55	1.0
#11	60	1.0



Simulation of 2.4 mm thick Bi target does not fit well as relative efficiency

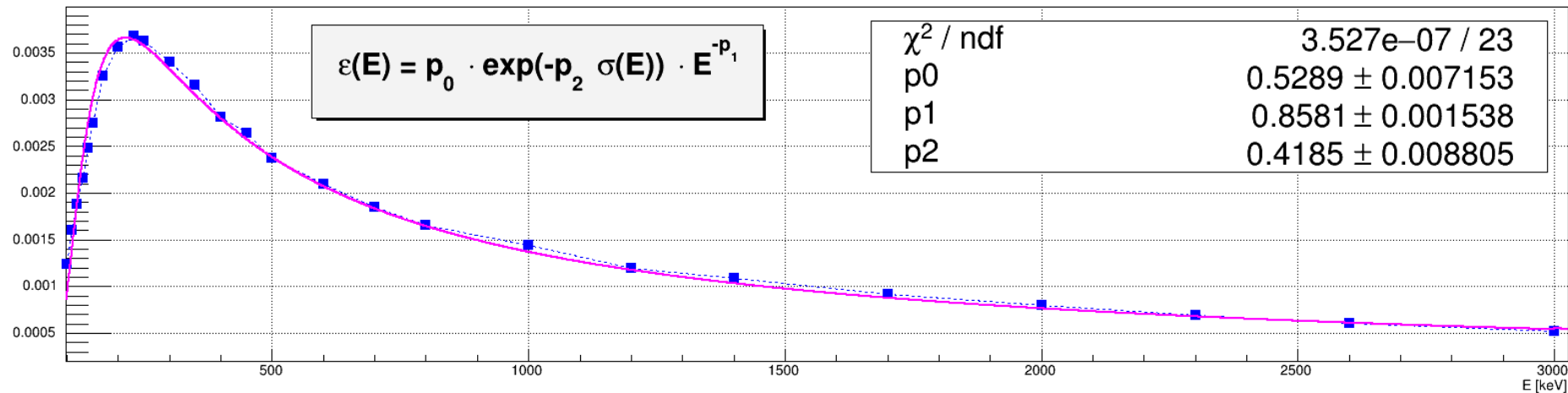
Абсолютная калибровка Ge-детектора по источникам ОСГИ

Simulation Fit to OSGI DATA, Source Position @ 10cm

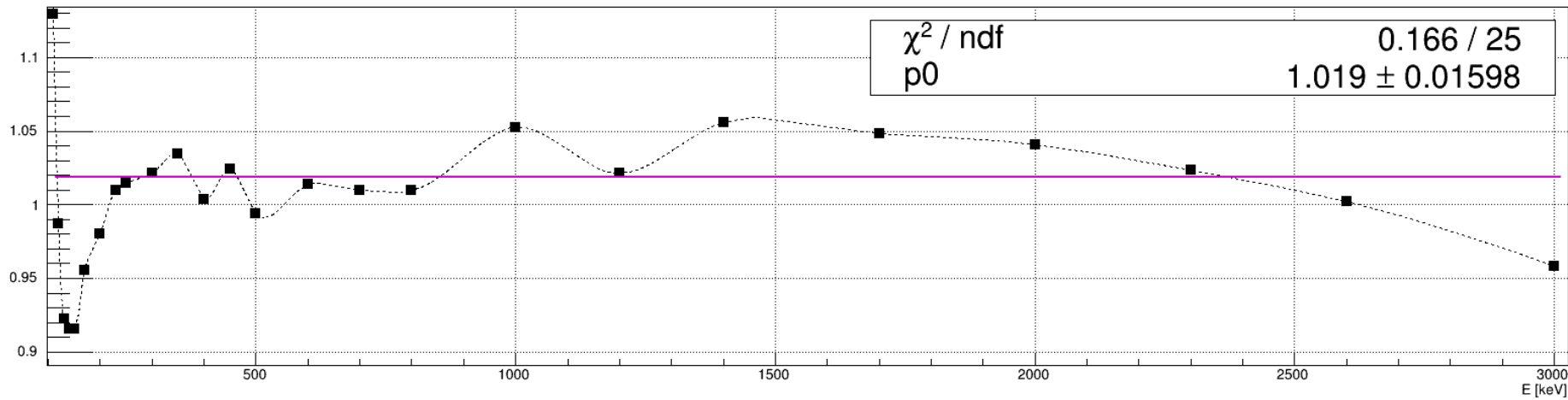


Гладкая модель кривой эффективности Ge-детектора с использованием гладкой функции сечения поглощения Bi

Fluka simulated absolute efficiency for 1.25 mm Bi sample @ 10 cm

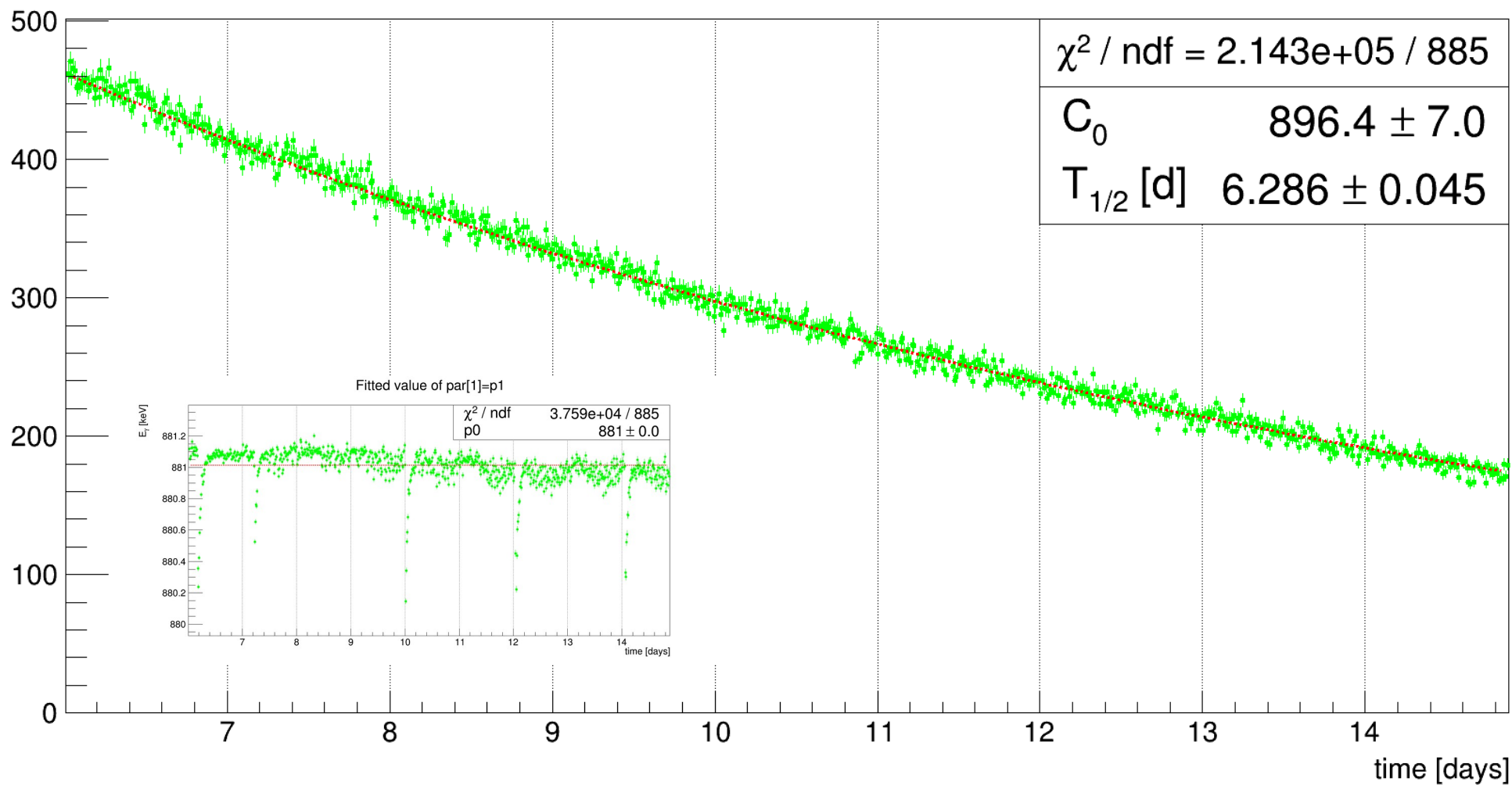


Sim Points divided by Fit (Bi absorbtion model * power law efficiency)



Фитирование спектральной линии изотопа Bi-206 и определение его периода полураспада

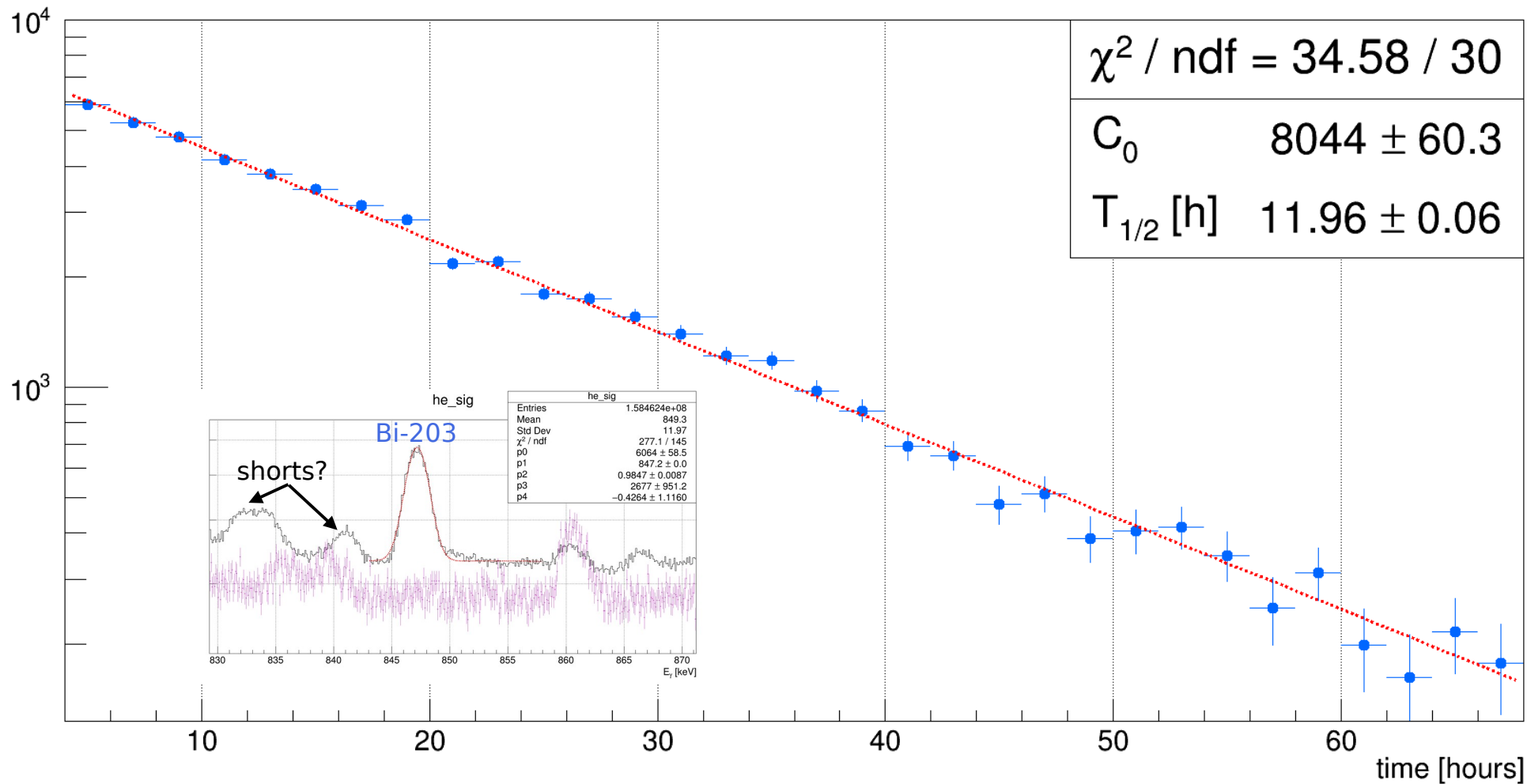
Fitted value of par[0]=p0



Bi-206 line @ 881.01 keV, $T_{1/2} = 6.243 \pm 0.003$ days

Фитирование спектральных линий изотопа Bi-203 и определение его периода полураспада (847.30 keV)

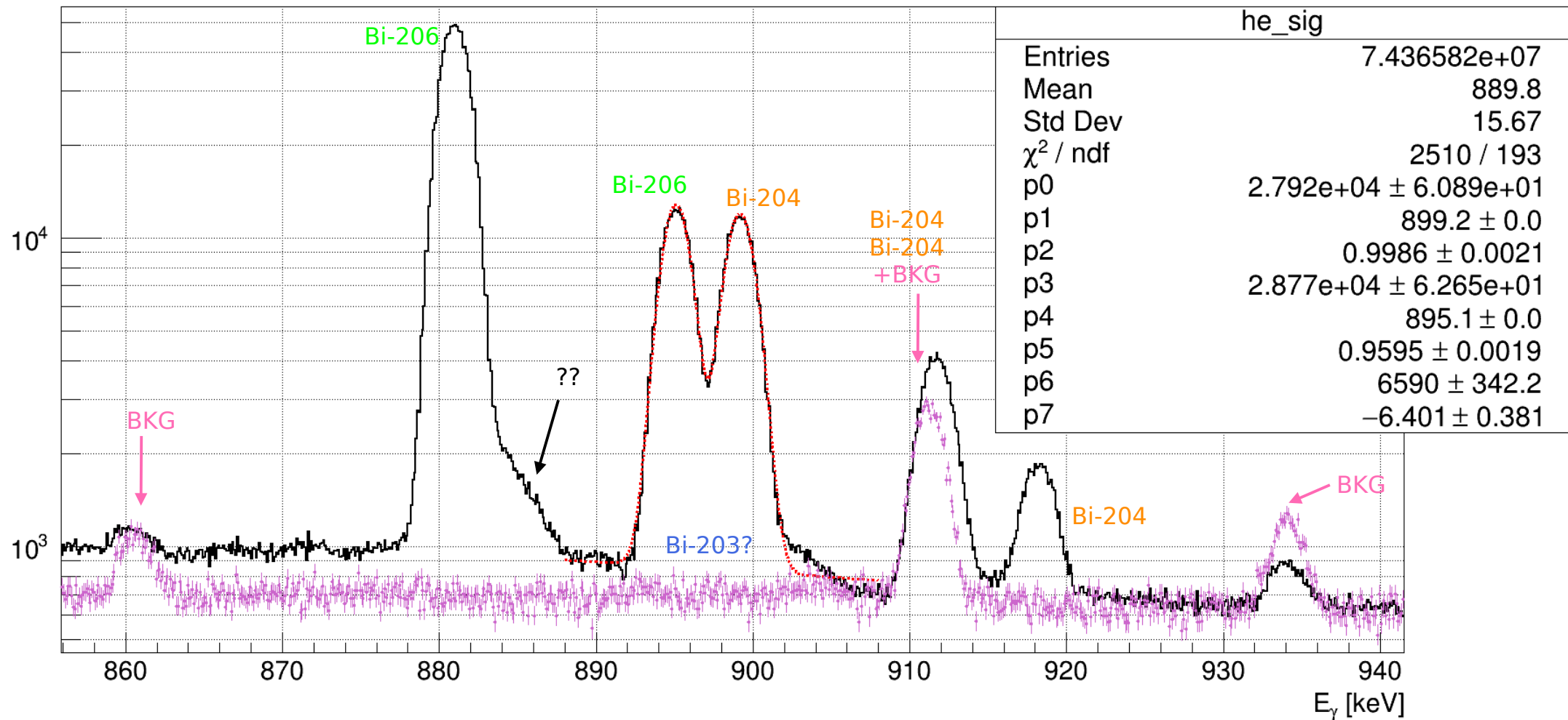
Fitted value of par[0]=p0



Bi-203 , $T_{1/2} = 11.76 \pm 0.05$ hours

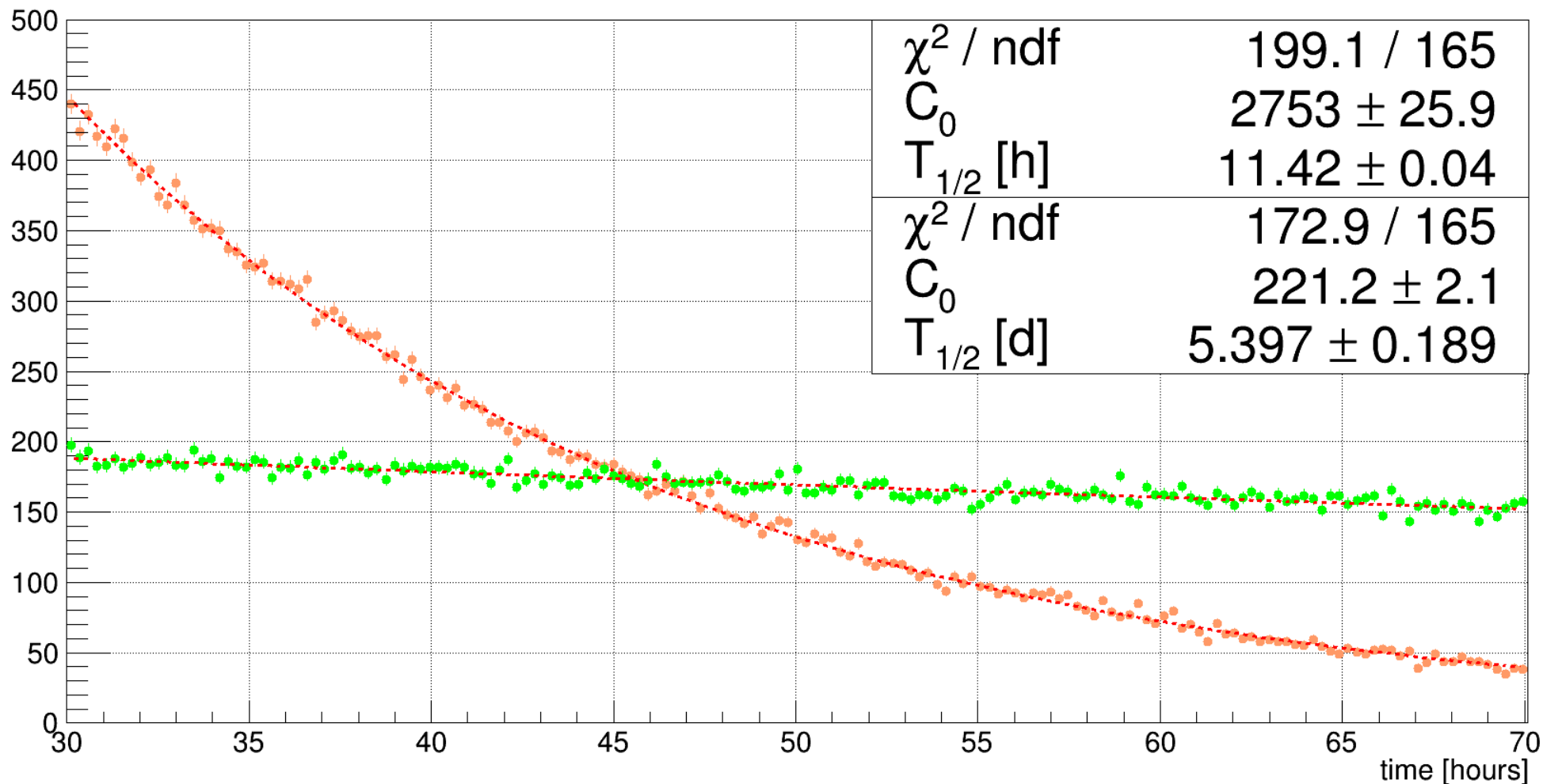
Фитирование спектральных линий изотопов Bi-206 и Bi-204 и определение их периодов полураспада

Fit of $^{206}\text{Bi}(895.12)$ and $^{204}\text{Bi}(899.15)$ Spectral Lines



Фитирование спектральных линий изотопов Bi-206 и Bi-204 и определение их периодов полураспада (3)

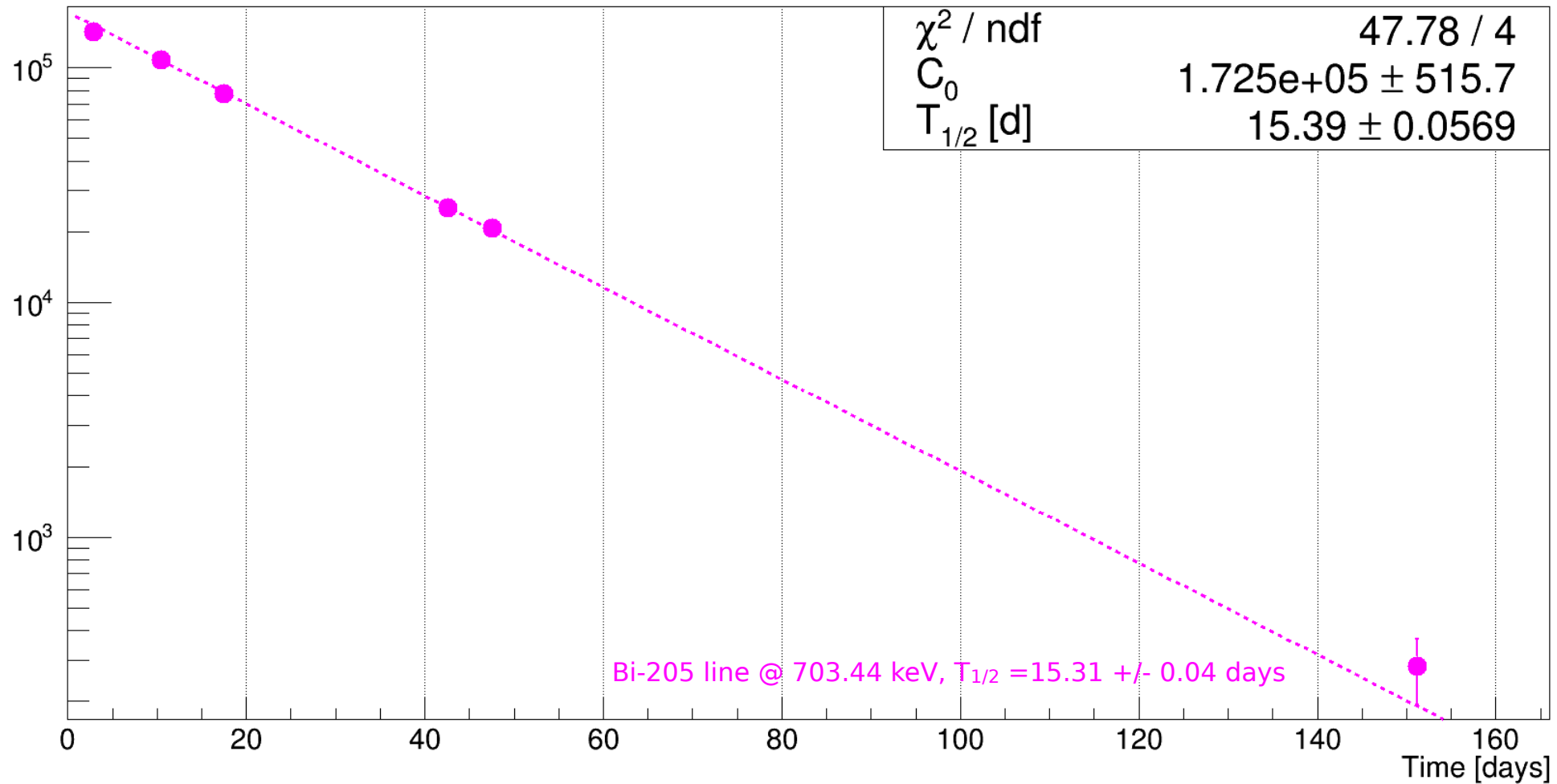
Fitted value of par[0]=p0



Bi-204 line @ 899.15 keV, $T_{1/2} = 11.22 \pm 0.10$ hours
Bi-206 line @ 895.12 keV, $T_{1/2} = 6.243 \pm 0.003$ days

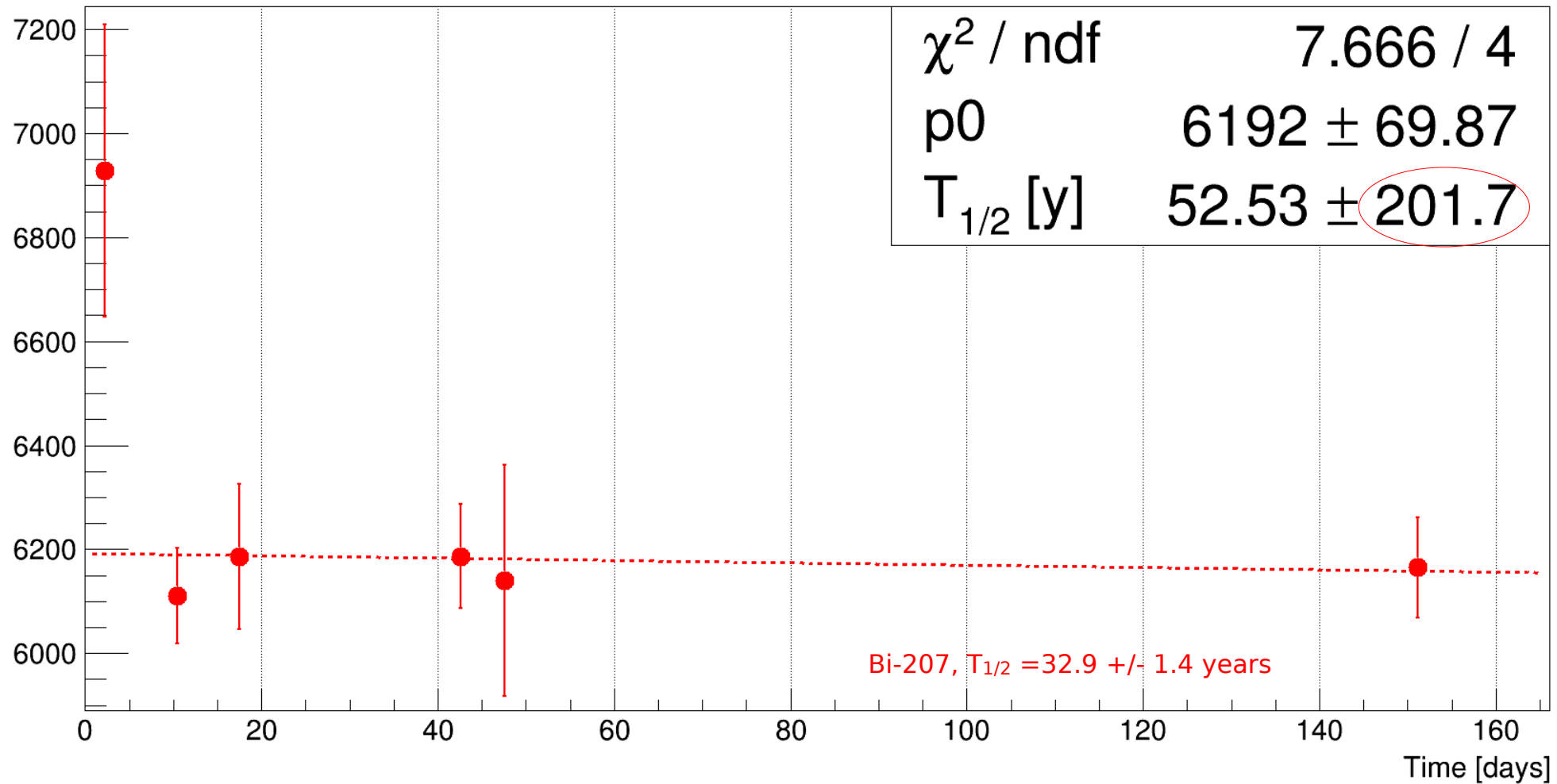
Фитирование спектральной линии 703.44 keV изотопа Bi-205 и определение его периода полураспада

Bi-205 HalfLife Fit from 703.44 keV Line



Фитирование спектральной линии 1063.662 keV изотопа Bi-207 и определение его периода полураспада

Bi-207 Halflife Fit from 1063.662 keV Line



Актуальные экспериментальные данные о фоторождении N нейтронов в висмуте (таблица)

ENERGY	Bi-207	Bi-206	Bi-205	Bi-204	Bi-204
[MeV]	2n	3n	4n	5n	6n
35	L/G	L/G	L/G	L	0
40	L/G	L/G	L/G	L	0
45	L	L	L	L	L
50	L	L/P	L/P	L/P	L/P
55	L/M	L/M/P	L/M/P	L/M/P	L/M/P
60	L	L/P	L/P	L/P	L/P
65	M	M/P	M/P	M/P	M/P
70	---	P	P	P	P

Experiment:

- “L” LINAC-2022
- “M” MSU MIKROTRON (` 10, ` 15)
- “P” POHANG LINAC (Naik ` 11)
- “G” New-SUBARU Synch. (` 19)

Method:

BS+Spectroscopy
 BS+Spectroscopy
 BS+Spectroscopy
 QuasiMono+nCounting

Result Type:

Yields (Rel?)
 Yields
 FluxAve CSs
 True CSs

Эксп. данные о фотопоглощении Bi (2)

• Ermakov-2010, 66.7 МэВ

ISSN 1063-7788, Physics of Atomic Nuclei, 2010, Vol. 73, No. 5, pp. 737–745. © Pleiades Publishing, Ltd., 2010.
Original Russian Text © A.N. Ermakov, B.S. Ishkhanov, I.M. Kapitonov, I.V. Makarenko, V.N. Orlin, 2010, published in Yadernaya Fizika, 2010, Vol. 73, No. 5, pp. 767–775.

NUCLEI
Experiment

Photodisintegration of Heavy Nuclei in the Energy Region above the Giant Dipole Resonance

A. N. Ermakov, B. S. Ishkhanov, I. M. Kapitonov, I. V. Makarenko*, and V. N. Orlin

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, 119992 Russia

Received May 4, 2009; in final form, September 15, 2009

Abstract—Experimental data on yields of multiparticle photonuclear reactions (involving the emission of up to seven neutrons from the nucleus involved) on ^{197}Au , $^{203,205}\text{Tl}$, and ^{209}Bi nuclei in the region extending from the giant dipole resonance to an energy of 67.7 MeV are presented. These data are compared with the results of modern theoretical calculations that take into account both the excitation of a giant dipole resonance (GDR) in a nucleus and the photodisintegration of quasideutrons (QD) in it. By and large, experimental data confirm the results of theoretical calculations—that is, only upon taking simultaneously into account both alternative photodisintegration mechanisms (GDR excitation and QD photodisintegration) can one describe these experimental data. The contribution of QD photodisintegration grows with increasing photon energy and neutron multiplicity and becomes dominant for reactions involving the emission of not less than five neutrons from the nucleus being considered. The integrated cross sections for the processes in question were estimated on the basis of simultaneously employing experimental yields of multinucleon photonuclear reactions and the respective cross-section shapes calculated theoretically.

DOI: 10.1134/S1063778810050029

• Belyshev-2015, 55.6 МэВ

Eur. Phys. J. A (2015) 51: 67
DOI 10.1140/epja/i2015-15067-2

THE EUROPEAN
PHYSICAL JOURNAL A

Regular Article – Experimental Physics

Multinucleon photonuclear reactions on ^{209}Bi : Experiment and evaluation

S.S. Belyshev¹, D.M. Filipescu², I. Gheoghe^{2,3}, B.S. Ishkhanov^{1,4}, V.V. Khankin⁴, A.S. Kurilik¹, A.A. Kuznetsov⁴, V.N. Orlin⁴, N.N. Peskov⁴, K.A. Stopani^{4,a}, O. Tesileanu², and V.V. Varlamov⁴

Received: 23 January 2015 / Revised: 15 April 2015

Published online: 11 June 2015 – © Società Italiana di Fisica / Springer-Verlag 2015

Communicated by C. Brogini

Abstract. Photon activation technique using bremsstrahlung with end-point energy 55.6 MeV is used to induce photonuclear reactions in a ^{209}Bi target. Absolute yields and integrated cross sections of multiparticle reactions ($\gamma, 2n-6n$), ($\gamma, 4n1p$), and ($\gamma, 5n1p$) are obtained. The results are compared to predictions of statistical models using systematical and microscopic description of photoabsorption and to the result of evaluation of the partial photoneutron reaction cross sections. Based on a comparison with existing experimental photoneutron cross sections and model calculations, we make a conclusion that neutron multiplicity assignment in available photoneutron cross sections on ^{209}Bi can be corrected and evaluated cross sections of ($\gamma, 1n$) and ($\gamma, 2n$) are obtained that are in an agreement with the obtained experimental results.

Эксп. данные о фотопоглощении Bi (3)

- Naik-2011 (South Korea) 50-70МэВ, includes comparison to older data

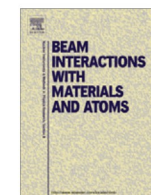
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 269 (2011) 1417–1424



Contents lists available at ScienceDirect

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B

journal homepage: www.elsevier.com/locate/nimb



Measurement of photo-neutron cross-sections in ^{208}Pb and ^{209}Bi with 50–70 MeV bremsstrahlung

Haladhara Naik^a, Sarbjit Singh^a, Ashok Goswami^a, Vijay Kumar Manchanda^a, Guinyun Kim^{b,*}, Kyung Sook Kim^b, Man-Woo Lee^b, Md. Shakilur Rahman^b, Devesh Raj^c, Srinivasan Ganesan^c, SaraswatulaVenkata Suryanarayana^d, Moo-Hyun Cho^e, Won Namkung^e

^a Radiochemistry Division, Bhabha Atomic Research Centre, Trombay, Mumbai-400085, India

^b Department of Physics, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Republic of Korea

^c Reactor Physics Design Division, Bhabha Atomic Research Centre, Trombay, Mumbai-400085, India

^d Nuclear Physics Division, Bhabha Atomic Research Centre, Trombay, Mumbai-400085, India

^e Pohang Accelerator Laboratory, Pohang University of Science and Technology, Pohang 790-784, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 December 2010

Received in revised form 14 March 2011

Available online 13 April 2011

Keywords:

50–70 MeV bremsstrahlung

Photo-neutron cross-sections

$^{208}\text{Pb}(\gamma, xn)$ and $^{209}\text{Bi}(\gamma, xn)$ reactions

Off-line γ -ray spectrometric technique

ABSTRACT

The photo-neutron cross-sections of ^{208}Pb and ^{209}Bi induced by 50–70 MeV bremsstrahlung have been measured by using the off-line γ -ray spectrometric technique in the electron linac at the Pohang Accelerator Laboratory. The experimental $^{208}\text{Pb}(\gamma, xn)$ and the $^{209}\text{Bi}(\gamma, xn)$ reactions cross-sections at the bremsstrahlung energy region of 50–70 MeV, which are determined for the first time, are in general good agreement with the theoretical values based on the TALYS 1.0 code. We observed that the photo-neutron cross-sections for the (γ, xn) reactions of ^{209}Bi and ^{208}Pb increase with increasing of bremsstrahlung energy from 50 to 70 MeV, which indicates the role of excitation energy. It was also observed that the (γ, xn) reaction cross-sections of the doubly magic shell nuclei $^{126}_{82}\text{Pb}$ are always higher than those of the singly magic shell nuclei $^{126}_{83}\text{Bi}$ in the bremsstrahlung energy of 50–70 MeV. This may be due to the fact that either the shell effect are washed out at the higher excitation energy or due to the lower fission cross-section of ^{208}Pb compared to that of ^{209}Bi . This observation indicates that there is a competition reaction between fission and neutron emission.

Эксп. данные о фотопоглощении Bi (4)

- **Gheorghe-2017**

PHYSICAL REVIEW C **96**, 044604 (2017)

Photoneutron cross-section measurements in the $^{209}\text{Bi}(\gamma, xn)$ reaction with a new method of direct neutron-multiplicity sorting

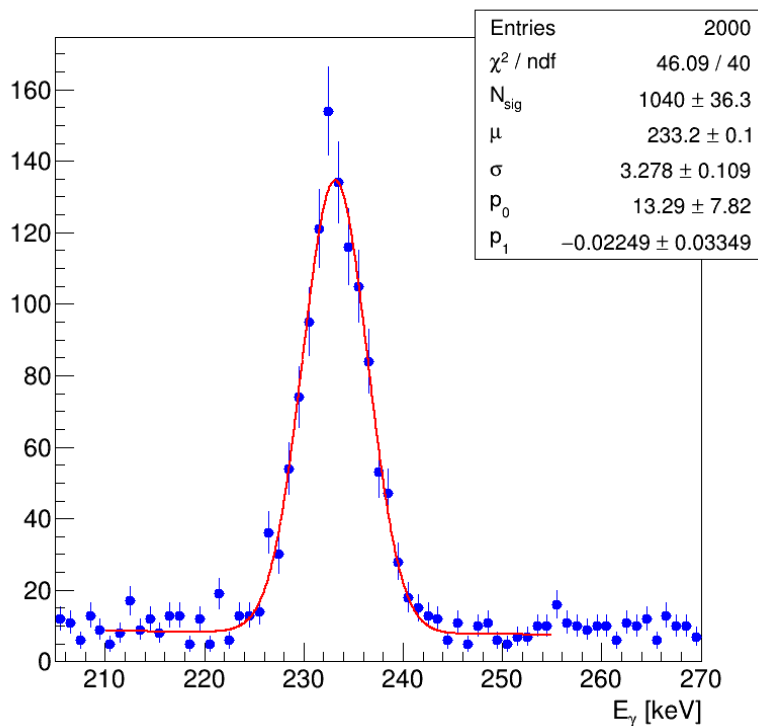
I. Gheorghe,^{1,2} H. Utsunomiya,^{3,*} S. Katayama,³ D. Filipescu,^{1,4} S. Belyshev,⁵ K. Stopani,⁶ V. Orlin,⁶ V. Varlamov,⁶ T. Shima,⁷ S. Amano,⁸ S. Miyamoto,⁸ Y.-W. Lui,⁹ T. Kawano,¹⁰ and S. Goriely¹¹

(Received 28 June 2017; published 6 October 2017)

Photoneutron cross sections were measured in the $^{209}\text{Bi}(\gamma, xn)$ reaction with $x = 1-4$ at energies from the neutron threshold to 40 MeV using quasimonochromatic laser Compton-scattering γ -ray beams. A novel technique of direct neutron-multiplicity sorting with a flat-efficiency detector was used. Results are compared with the positron in-flight annihilation data of Livermore and Saclay as well as with bremsstrahlung data. The present neutron yields are consistent with the latest photoactivation measurement with bremsstrahlung. The giant dipole resonance component of the total photoneutron cross section is reasonably reproduced by model calculations of the Hartree-Fock Bogoliubov plus quasiparticle random phase approximation based on the Gogny DIM interaction for both E1 and M1 components. In contrast, the quasideuteron component of the total photoneutron cross section requires a factor of ~ 3 enhancement of the Levinger parameter. Furthermore, a survival of large (γ, n) cross sections above 20 MeV may indicate the surface effect on the two-component particle-hole state density. The threshold behavior of photoneutron emission is discussed in terms of the average neutron kinetic energy.

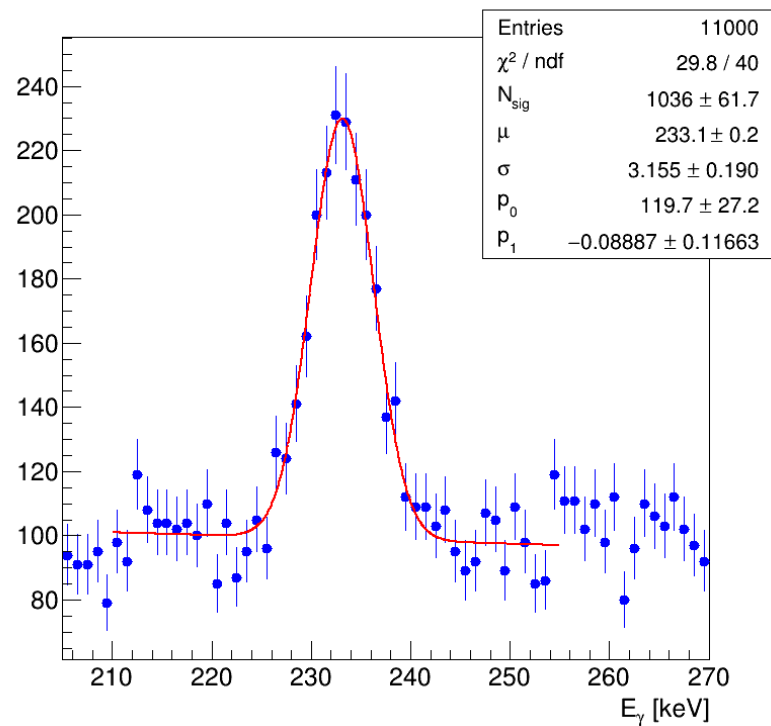
DOI: [10.1103/PhysRevC.96.044604](https://doi.org/10.1103/PhysRevC.96.044604)

Фитирование спектральной линии вместе с фоном (Той МС)



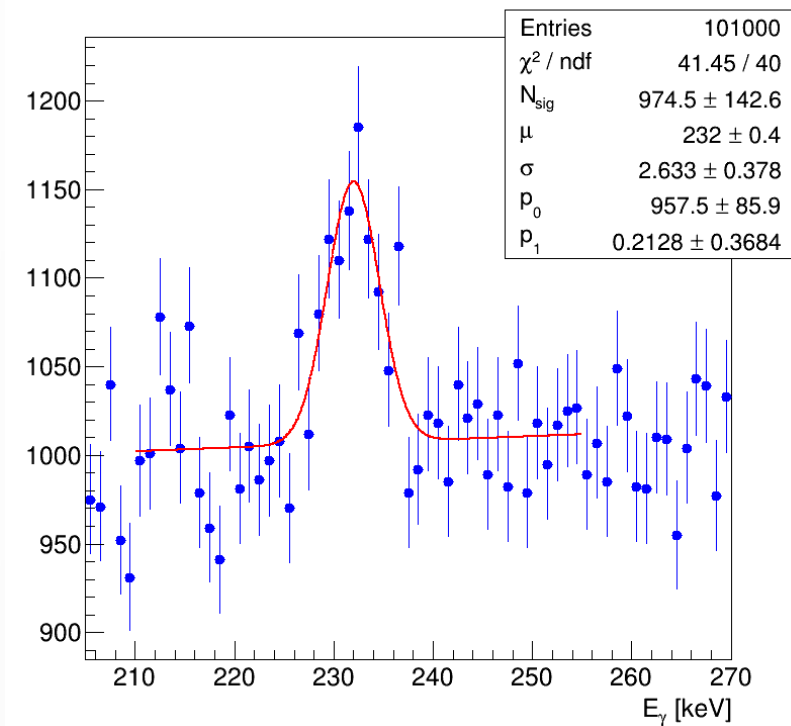
Low Bkg.

RelFitErr = 0.035



Bkg x 10

RelFitErr = 0.060

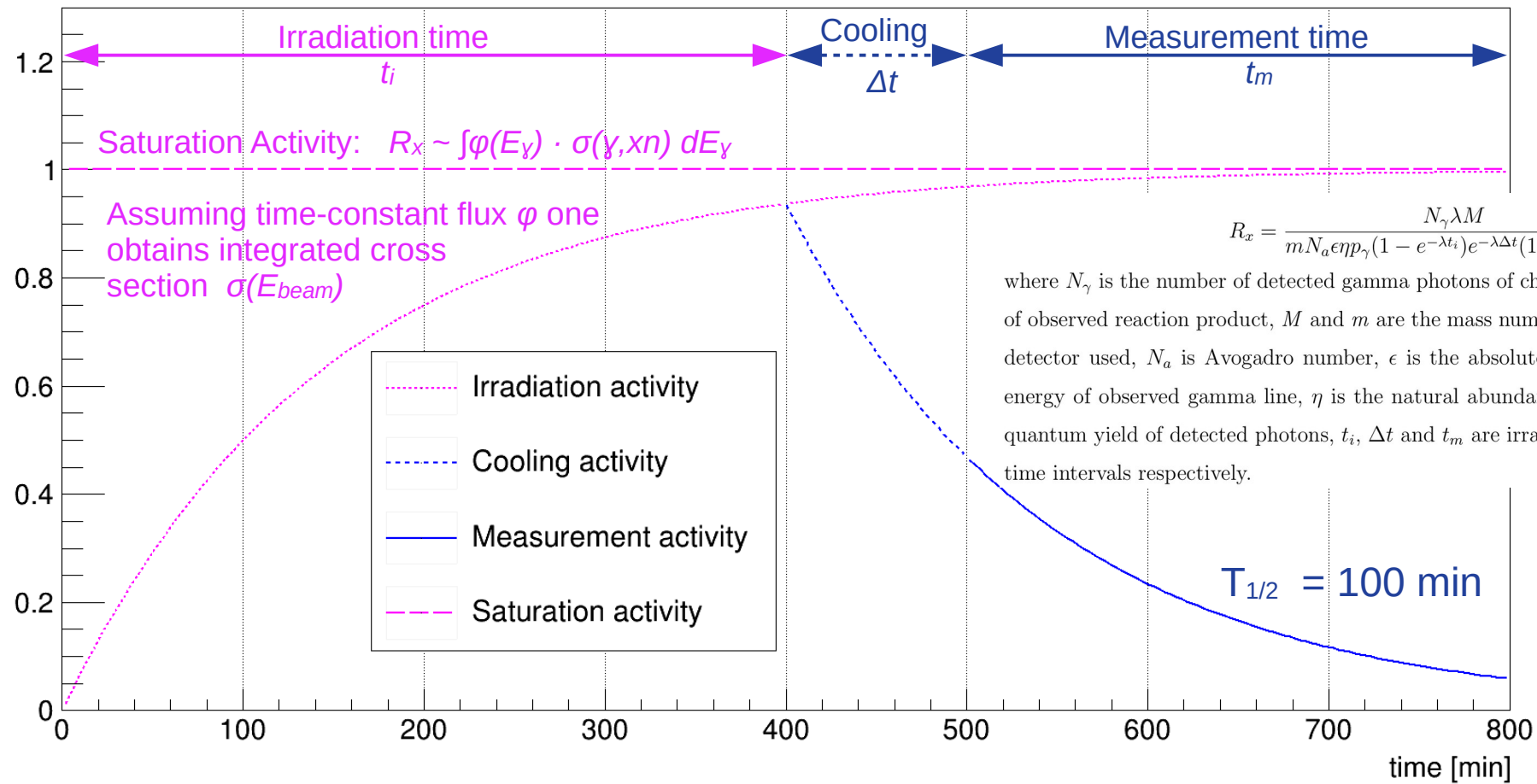


Bkg x 100

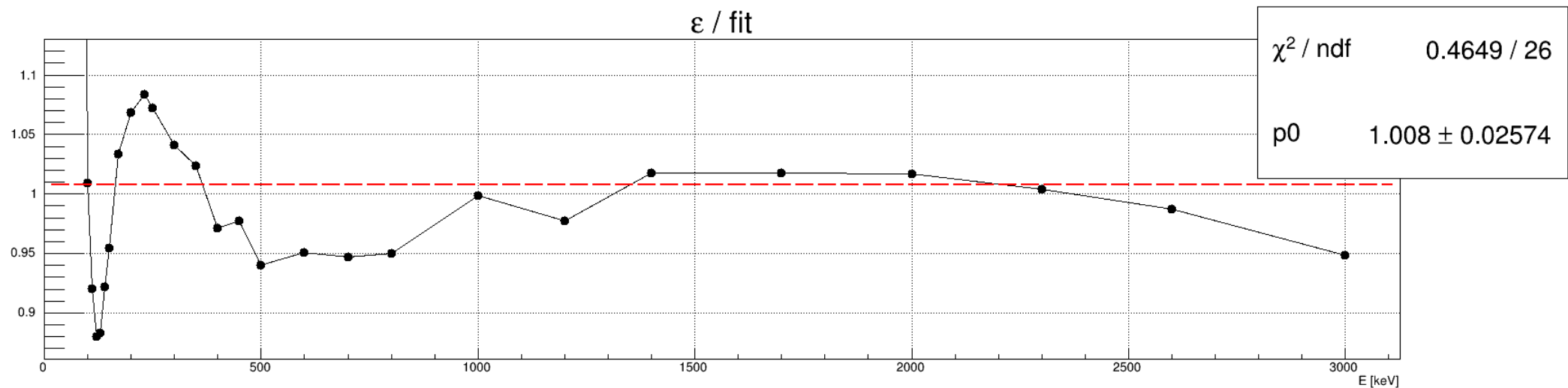
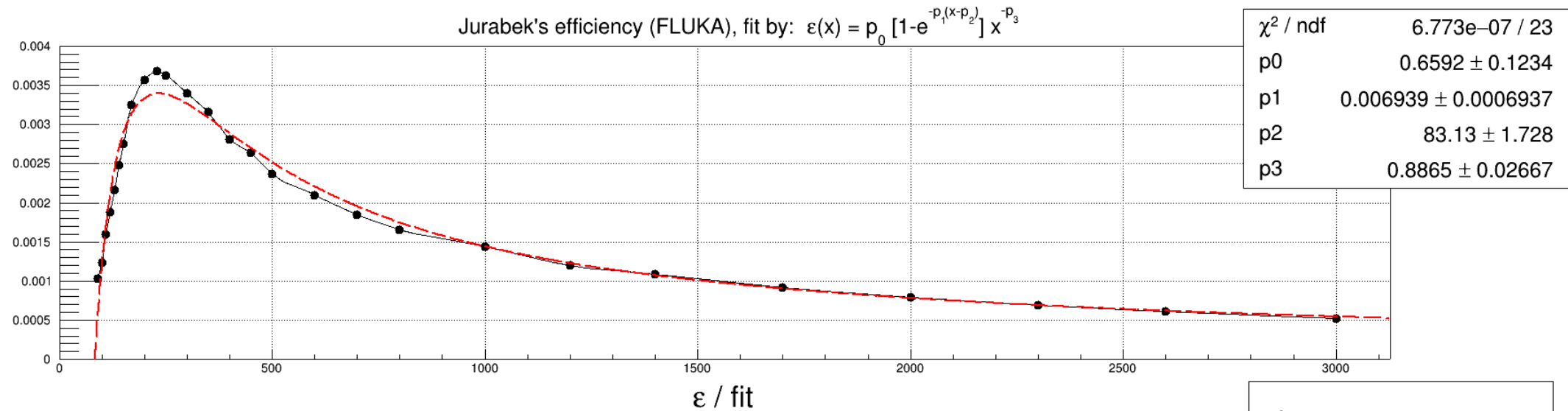
RelFitErr = 0.146

Toy MC: $N_{\text{events}} = 1000$, $N^{-1/2} = 0.032$, all signal events are the same!

Измерение сечения через активность насыщения (Saturation Activity)



Фитирование модели эффективности детектора гладкой функцией

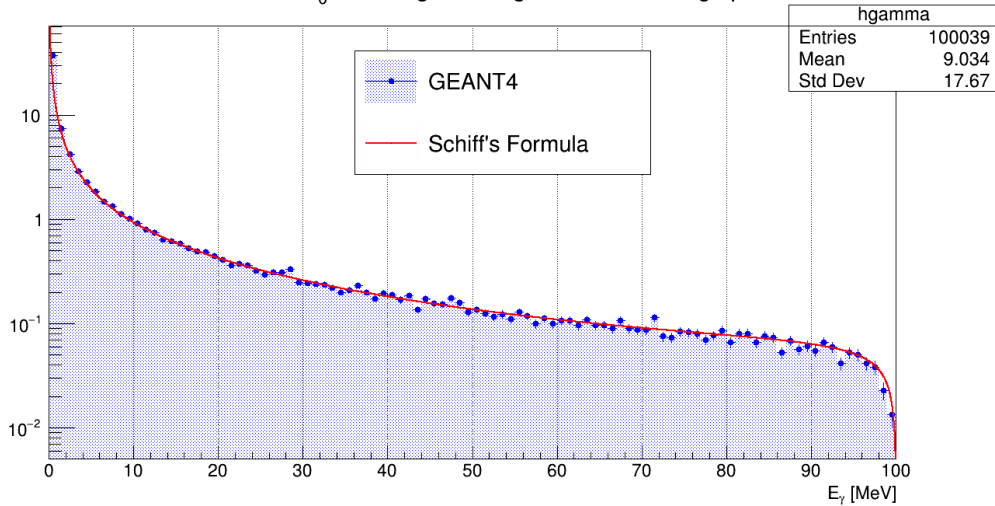


Пороги реакций ($\gamma, N \cdot n$) и периоды полураспада

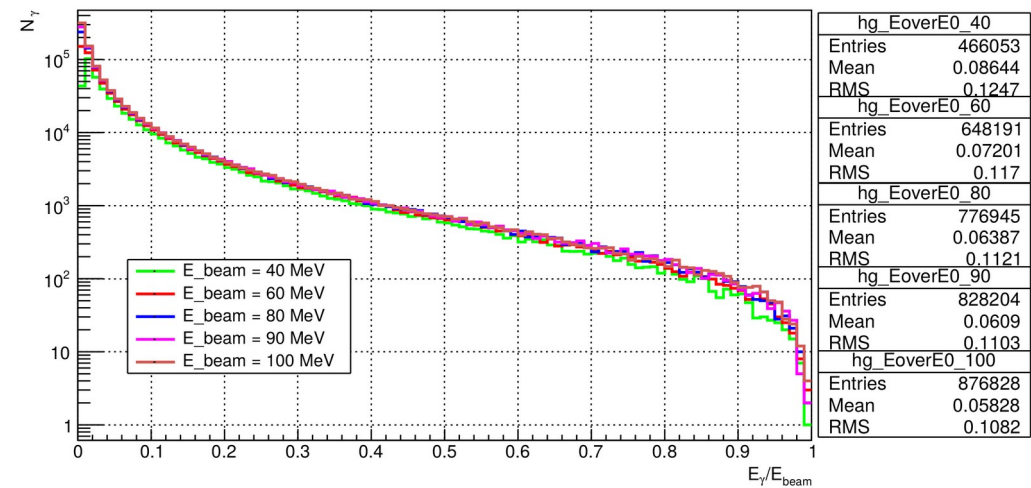
Final Isotop	N(n)	T _{1/2}	E _{bind} [MeV]	THL _{theor} [MeV]	THL _{exp} [MeV]	20	25	35	40	45	50	55	60
Bi 209	0	"stable"	1639.56	0.00	0.0000								
Bi 208	1	368000 years	1632.23	7.33	7.4598								
Bi 207	2	32.9 years	1625.63	13.93	14.3467								
Bi 206	3	6.243 days	1617.46	22.10	22.4444								
Bi 205	4	15.31 days	1610.67	28.89	29.4783								
Bi 204	5	11.22 hours	1602.30	37.26	37.9693								
Bi 203	6	11.76 hours	1595.07	44.49	45.1617								
Bi 202	7	1.72 hours	1586.35	53.21	54.0071								
Bi 201	8	108 min	1578.91	60.65	61.4003								
Bi 200	9	36.4 min	1569.79	69.77	70.5301								
Bi 199	10	27 min	1562.21	77.35	78.1744								

Результаты моделирования в GEANT4 спектров тормозного излучения vs. формула Шиффа

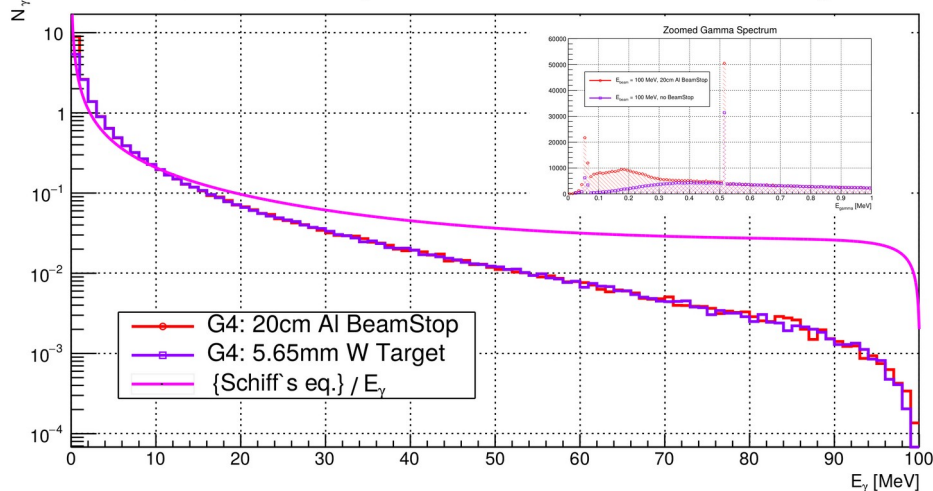
G4Sim of $0.01 \cdot X_0$ thin tungsten target bremsstrahlung spectrum



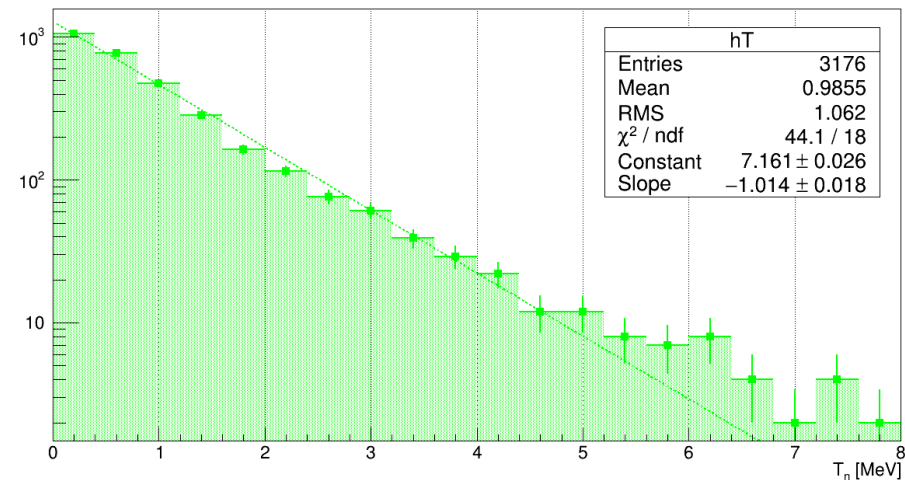
Gamma Spectrum Shapes after 5.65mm W Radiator hit with e^- beam



G4 Simulation of Gamma Spectrum after 100 MeV electron beam hits 5.65 mm W target

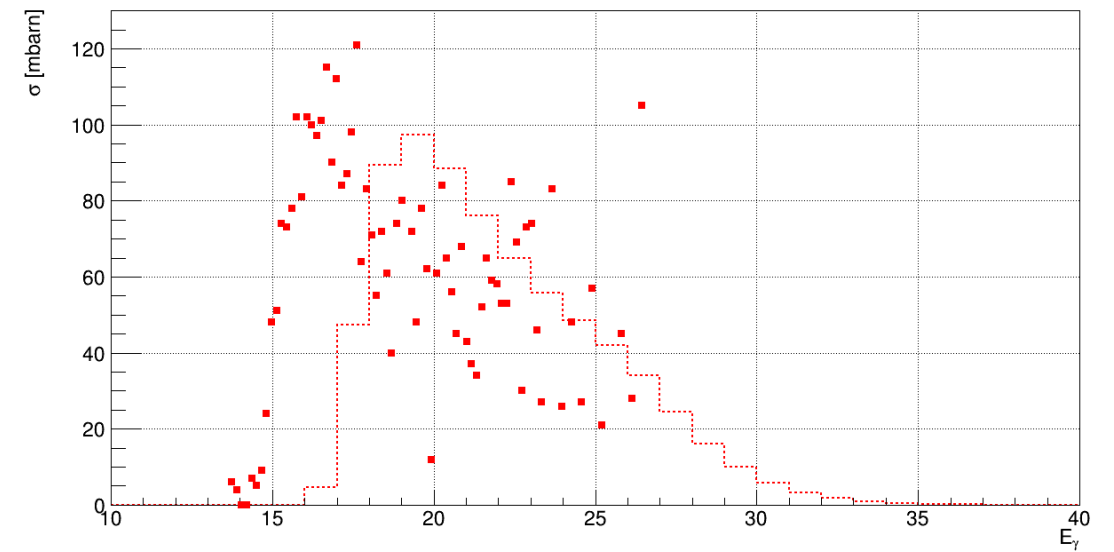
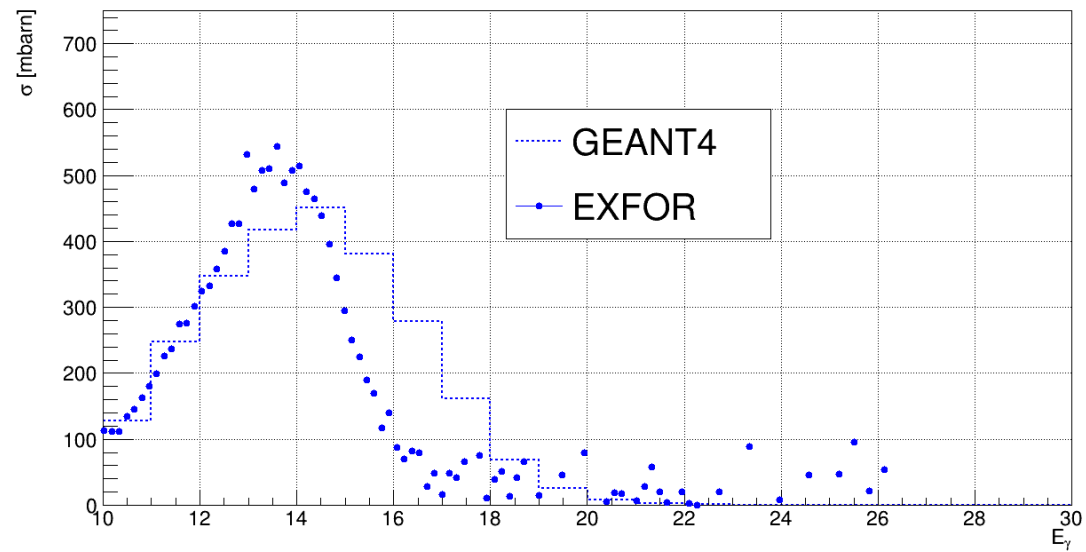


G4 Simulation of neutron kinetic energy spectrum, 100 MeV e^- beam on 5.65 mm W radiator



Выход нейтронов ~ 0.003 на 1 электрон пучка

GEANT4.11 vs. Harvey-1964, реакции (γ, n) и $(\gamma, 2n)$



Измерение сечений Gheorghe-2017

