



BECQUEREL  
PROJECT

Проект  
БЕККЕРЕЛЬ

Beryllium (Boron)

Clustering

Quest in

Relativistic Multifragmentation

<http://becquerel.jinr.ru>

# Взаимодействия ультрарелятивистских мюонов в ядерной эмульсии

*Денис Артеменков,*

*ЛФВЭ, ОИЯИ*

*17 апреля 2018*



BECQUEREL  
PROJECT

Проект  
БЕККЕРЕЛЬ

Beryllium (Boron)

Clustering

Quest in

Relativistic Multifragmentation

<http://becquerel.jinr.ru>

**BECQUEREL at the JINR Nuclotron is devoted systematic exploration of clustering features of light stable and radioactive nuclei.**



**The fragmentation of a large variety of light nuclei was investigated using the emulsions exposed to few A GeV nuclear beams at JINR Nuclotron. A nuclear track emulsion is used to explore the fragmentation of the relativistic nuclei.**

## Secondary nuclear fragment beams for investigations of relativistic fragmentation of light radioactive nuclei using nuclear photoemulsion at Nuclotron

P.A. Rukoyatkin<sup>a</sup>, L.N. Komolov, R.I. Kukushkina, V.N. Ramzhin, and P.I. Zarubin

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ДИССОЦИАЦИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР <sup>8</sup>V В ЯДЕРНОЙ ЭМУЛЬСИИ

© 2009 г. Р. Станоева<sup>1,2)</sup>, Д. А. Артеменков<sup>1)</sup>, В. Браднова<sup>1)</sup>, С. Вокал<sup>1,3)</sup>, Л. А. Гончарова<sup>4)</sup>, П. И. Зарубин<sup>1)\*</sup>, И. Г. Зарубина<sup>1)</sup>, Н. А. Качалова<sup>1)</sup>, А. Д. Коваленко<sup>1)</sup>, Д. О. Кривенков<sup>1)</sup>, А. И. Малахов<sup>1)</sup>, Г. И. Орлова<sup>4)</sup>, Н. Г. Пересадько<sup>4)</sup>, Н. Г. Полухина<sup>4)</sup>, П. А. Рукояткин<sup>1)</sup>, В. В. Русакова<sup>1)</sup>, М. Хайдук<sup>5)</sup>, С. П. Харламов<sup>4)</sup>, М. М. Чернявский<sup>4)</sup>, Т. В. Щедрина<sup>1)</sup>

### ELEMENTARY PARTICLES AND FIELDS Experiment

## Fragmentation of Relativistic Nuclei in Peripheral Interactions in Nuclear Track Emulsion\*

D. A. Artemenkov<sup>1)\*\*</sup>, V. Bradnova<sup>1)</sup>, M. M. Chernyavsky<sup>2)</sup>, L. A. Goncharova<sup>2)</sup>, M. Haiduc<sup>3)</sup>, N. A. Kachalova<sup>1)</sup>, S. P. Kharlamov<sup>2)</sup>, A. D. Kovalenko<sup>1)</sup>, A. I. Malakhov<sup>1)</sup>, A. A. Moiseenko<sup>4)</sup>, G. I. Orlova<sup>2)</sup>, N. G. Peresadko<sup>2)</sup>, N. G. Polukhina<sup>2)</sup>, P. A. Rukoyatkin<sup>1)</sup>, V. V. Rusakova<sup>1)</sup>, V. R. Sarkisyan<sup>4)</sup>, R. Stanoeva<sup>5)</sup>, T. V. Shchedrina<sup>1)</sup>, S. Vokál<sup>1)</sup>, A. Vokálová<sup>1)</sup>, P. I. Zarubin<sup>1)\*\*\*</sup>, and

## КОГЕРЕНТНАЯ ДИССОЦИАЦИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР <sup>9</sup>C

© 2010 г. Д. О. Кривенков<sup>1)</sup>, Д. А. Артеменков<sup>1)</sup>, В. Браднова<sup>1)</sup>, С. Вокал<sup>2)</sup>, П. И. Зарубин<sup>1)\*</sup>, И. Г. Зарубина<sup>1)</sup>, Н. В. Кондратьева<sup>1)</sup>, А. И. Малахов<sup>1)</sup>, А. А. Моисеенко<sup>3)</sup>, Г. И. Орлова<sup>4)</sup>, Н. Г. Пересадько<sup>4)</sup>, Н. Г. Полухина<sup>4)</sup>, П. А. Рукояткин<sup>1)</sup>, В. В. Русакова<sup>1)</sup>, В. Р. Саркисян<sup>3)</sup>, Р. Станоева<sup>1)</sup>, М. Хайдук<sup>5)</sup>, С. П. Харламов<sup>4)</sup>

## Detailed study of relativistic <sup>9</sup>Be → 2α fragmentation in peripheral collisions in a nuclear track emulsion\*

D. A. Artemenkov<sup>\*\*</sup>, D. O. Krivenkov, T. V. Shchedrina, R. Stanoeva, P. I. Zarubin

## ОБЛУЧЕНИЕ ЯДЕРНОЙ ЭМУЛЬСИИ В СМЕШАННОМ ПУЧКЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР <sup>12</sup>N, <sup>10</sup>C И <sup>7</sup>Be

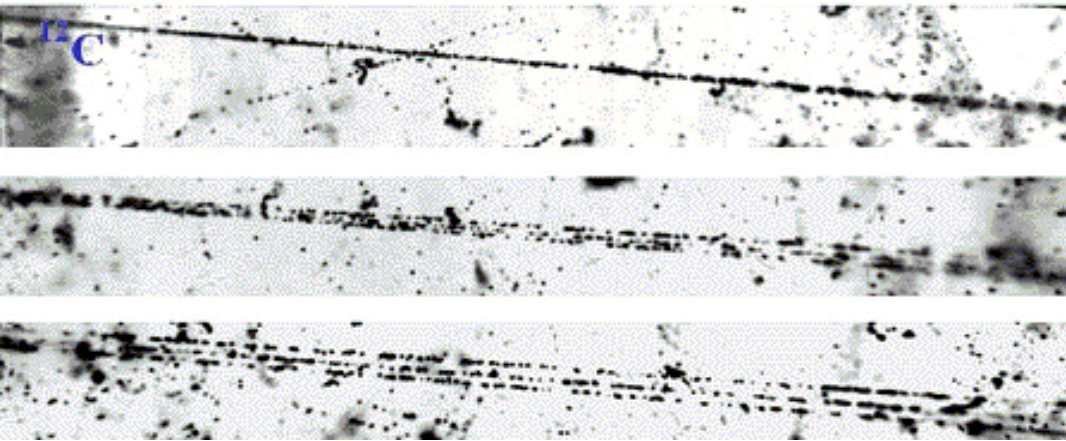
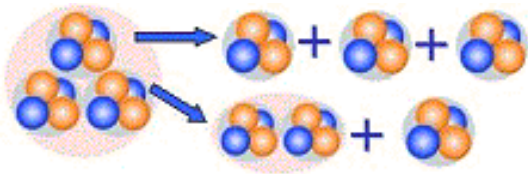
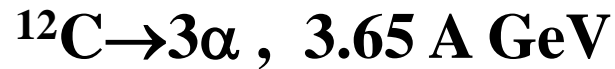
© 2010 г. Р. Р. Каттабеков<sup>1,2)</sup>, К. З. Маматкулов<sup>1,3)</sup>, Д. А. Артеменков<sup>1)</sup>, В. Браднова<sup>1)</sup>, С. Вокал<sup>4)</sup>, Д. М. Жомуродов<sup>1,3)</sup>, П. И. Зарубин<sup>1)\*</sup>, И. Г. Зарубина<sup>1)</sup>, З. А. Игамкулов<sup>1,3)</sup>, Н. В. Кондратьева<sup>1)</sup>, Н. К. Корнегруца<sup>1)</sup>, Д. О. Кривенков<sup>1)</sup>, А. И. Малахов<sup>1)</sup>, Г. И. Орлова<sup>3)</sup>, Н. Г. Пересадько<sup>5)</sup>, Н. Г. Полухина<sup>5)</sup>, П. А. Рукояткин<sup>1)</sup>, В. В. Русакова<sup>1)</sup>, Р. Станоева<sup>1,6)</sup>, М. Хайдук<sup>7)</sup>, С. П. Харламов<sup>5)</sup>



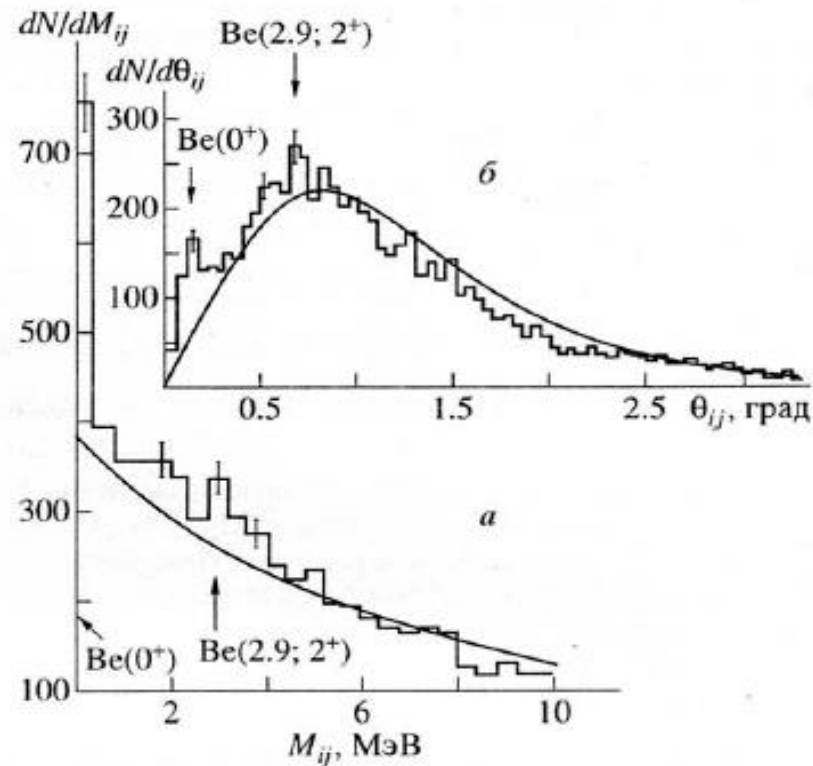
ELEMENTARY PARTICLES AND FIELDS  
Experiment

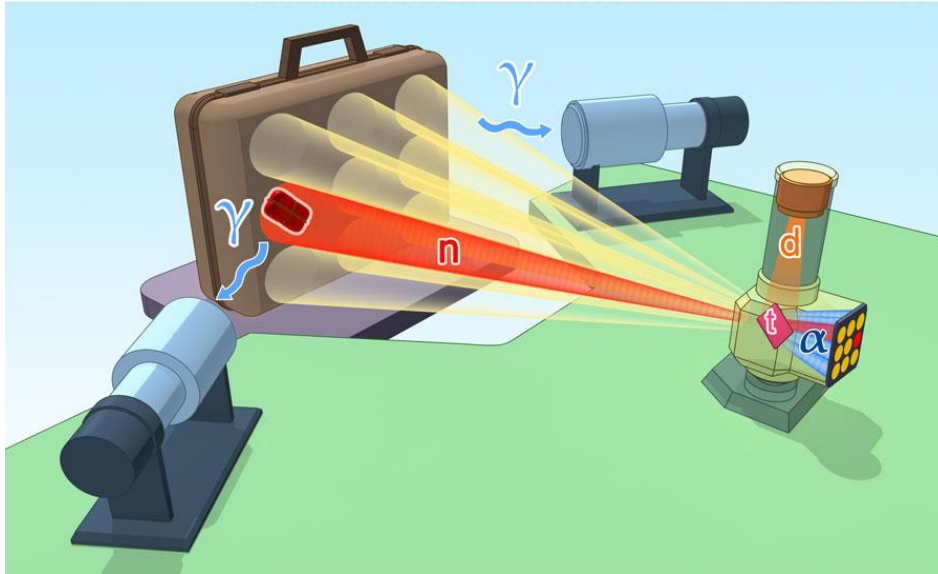
Coherent Dissociation  $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$  in Lead-Enriched Emulsion  
at 4.5 GeV/c per Nucleon

V. V. Belaga, A. A. Benjaza<sup>1)</sup>, V. V. Rusakova, J. A. Salamov<sup>2)</sup>, and G. M. Chernov

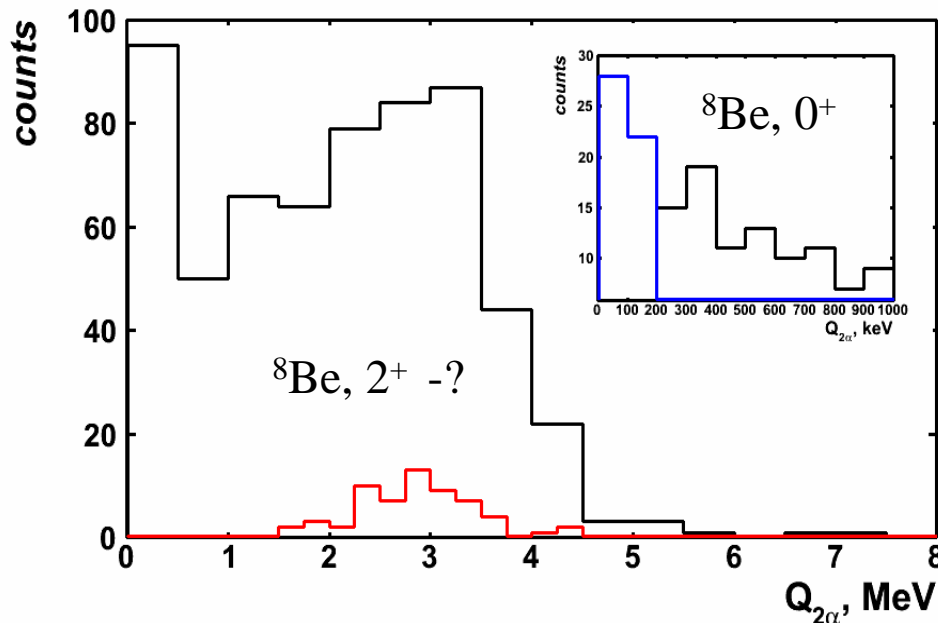
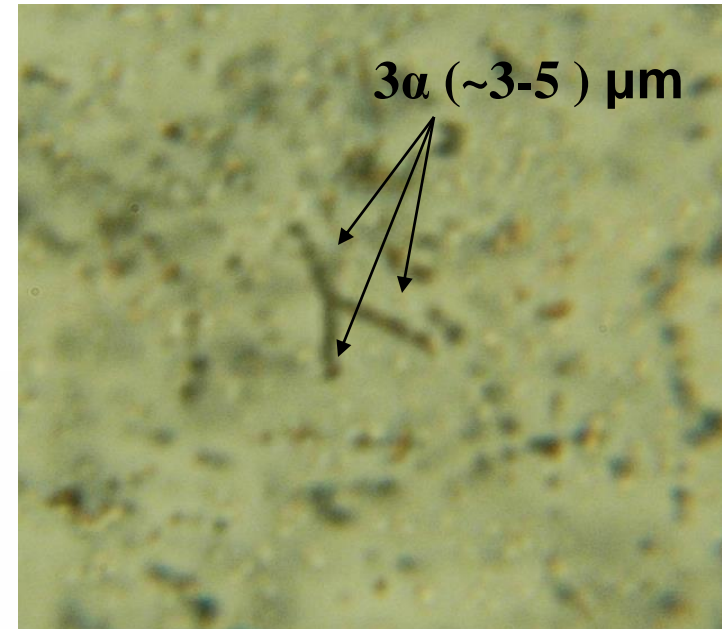


(PAVICOM image)





DVIN - explosives detector on the basis of fast tagged neutron method for complex program for population safety in transport



$$M_{2\alpha} = \left[ 2(m_{\alpha}^2 + E_{\alpha 1} E_{\alpha 2} - p_{\alpha 1} p_{\alpha 2} \cos(\Theta_{12})) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$Q_{2\alpha} = M_{2\alpha} - 2 \cdot m_{\alpha}$$

## Inelastic Muon Interactions in Nuclear Emulsion at 2.5 and 5.0 GeV (\*).

J. A. KIRK, D. M. COTTRELL, J. J. LORD and R. J. PISERCHIO

*Department of Physics, University of Washington - Seattle, Wash.*

(ricevuto il 25 Maggio 1965)

IL NUOVO CIMENTO

VOL. 10 A, N. 3

1 Agosto 1972

## Inelastic Interaction Induced by High-Energy Muons (6 GeV, 12 GeV) at Low Momentum-Transfer in Nuclear Emulsion (\*).

J. C. MONTRET, B. COUPAT, B. MICHEL and F. VAZELLE

*Laboratoire de Physique Corpusculaire, Université de Clermont - Clermont-Ferrand (\*\*)*

(ricevuto il 2 Novembre 1971)

**Summary.** — Inelastic scattering of 6 and 12 GeV muons has been studied in Ilford K5 nuclear emulsions. For energy transfers greater than 150 MeV (for  $\pi$  muoproduction threshold) and a four-momentum transfer smaller than  $0.1 (\text{GeV}/c)^2$ , the cross-sections are respectively  $(11.1 \pm 1.4) \mu\text{b/nucleon}$  at 12 GeV and  $(6.8 \pm 0.9) \mu\text{b/nucleon}$  at 6 GeV. The ratios of the mean values of the longitudinal and transverse cross-sections are respectively  $0.46 \pm 0.15$  and  $0.25 \pm 0.15$ . These values are very useful for a comparison between electron and muon.

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 177, NUMBER 5

25 JANUARY 1969

## Inelastic Nuclear Interactions of High-Energy Electrons and Muons in Emulsion\*

RICHARD L. THOMPSON† AND J. J. LORD  
*University of Washington, Seattle, Washington 98105*

AND

JAMES A. KIRK  
*Idaho State University, Pocatello, Idaho 93201*

AND

MARTIN E. NELSON‡  
*University of Puget Sound, Tacoma, Washington 98416*

AND

ROBERT J. PISERCHIO  
*San Diego State College, San Diego, California 92115*  
(Received 16 September 1968)

An experiment has been carried out to examine the inelastic nuclear interaction properties of high-energy electrons and muons in emulsion. A study was made of interactions produced by 10.5-GeV muons and 10.0- and 16.0-GeV electrons. Total and differential cross sections have been measured and compared with calculations carried out with the formulation of Hand and Wilson for inelastic lepton scattering. On the basis of the calculations, the ratio of electron to muon total cross sections was found to be 3.5:1, whereas experimentally the ratio was measured to be  $2.18 \pm 0.40$  for the 10-GeV leptons. To explain the total cross section for electrons, an average scalar-photon contribution equal to 12% of the transverse-photon cross section is needed, which is consistent with other experiments. The muon cross section was found to be significantly larger than expected, and it cannot be explained by a similar scalar-photon contribution. The energy dependence of the total cross sections is in agreement with theory, as are the angular distributions of the scattered leptons.

# ЯЭ была облучена в гало пучка мюонов с энергией 160 ГэВ в ЦЕРН. Целью данного облучения было исследование характера взаимодействий мюонов с веществом эмульсионных слоев производства ООО «Славич».

International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2015)

IOP Publishing

Journal of Physics: Conference Series 675 (2016) 022022

doi:10.1088/1742-6596/675/2/022022

## Study of nuclear multifragmentation induced by ultrarelativistic $\mu$ -mesons in nuclear track emulsion

D A Artemenkov<sup>1,2</sup>, V Bradnova<sup>1</sup>, E Firu<sup>3</sup>, N K Kornegrutsa<sup>1</sup>, M Haiduc<sup>3</sup>, K Z Mamatkulov<sup>1</sup>, R R Kattabekov<sup>1</sup>, A Neagu<sup>3</sup>, P A Rukoyatkin<sup>1</sup>, V V Rusakova<sup>1</sup>, R Stanoeva<sup>4</sup>, A A Zaitsev<sup>1,5</sup>, P I Zarubin<sup>1,5</sup> and I G Zarubina<sup>1,5</sup>

<sup>1</sup> Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

<sup>2</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoe highway 31, Moscow, 115409, Russia

<sup>3</sup> Institute of Space Science, Magurele, Romania

<sup>4</sup> South-Western University, Blagoevgrad, Bulgaria

<sup>5</sup> P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: zarubin@lhe.jinr.ru

**Abstract.** Exposures of test samples of nuclear track emulsion were analyzed. The formation of high-multiplicity nuclear stars was observed upon irradiating nuclear track emulsions with ultrarelativistic muons. Kinematical features studied in this exposure of nuclear track emulsions for events of the muon-induced splitting of carbon nuclei to three  $\alpha$ -particles are indicative of the nuclear-diffraction interaction mechanism.

# Моделирование взаимодействия мюонов с веществом эмульсии в Geant4 (пакет физических процессов CHIPS)

## Geant 4

[Download](#) | [User Forum](#) | [Gallery](#)  
[Contact Us](#)

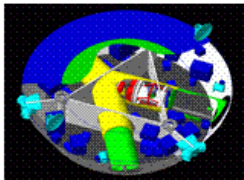
 

**Geant4** is a toolkit for the simulation of the passage of particles through matter. Its areas of application include high energy, nuclear and accelerator physics, as well as studies in medical and space science. The two main reference papers for Geant4 are published in *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* [506 \(2003\) 250-303](#), and *IEEE Transactions on Nuclear Science* [53 No. 1 \(2006\) 270-278](#).

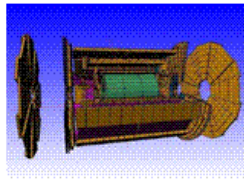
### Applications



### User Support



### Results & Publications



### Collaboration



### News

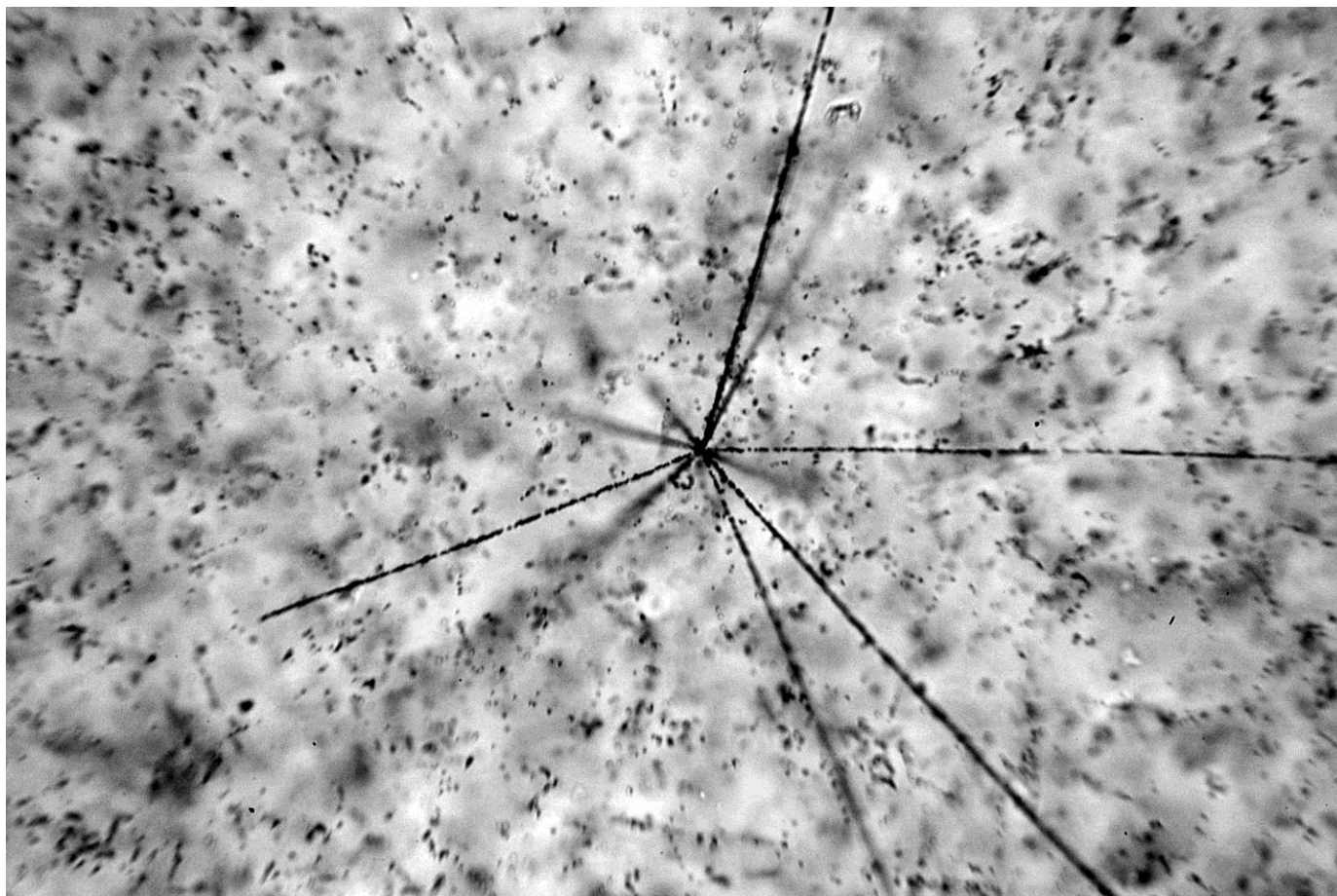
- 15 August 2012 - **Geant4-MT prototype 9.5.p01** is available from the [download](#) area.
- 29 June 2012 - **Release 9.6 BETA** is available from the [Beta download](#) area.
- 20 April 2012 - **Patch-04 to release 9.4** is available from the [archive download](#) area.

0							
Ag107[0.0]	-0.989608	-0.143787	0.00125273	0.11616	99557.6	0.224424	CoulombScat
...							
138							
C12[0.0]	-0.622228	0.0281198	0.782331	4.62371	11174.9	2.79682	photoNuclear
alpha	0.624062	-0.093819	-0.775722	11.5859	3727.38	74.9043	photoNuclear
....							
288							
alpha	-0.813296	-0.459737	-0.35664	2.09057	3727.38	6.06427	photoNuclear
alpha	-0.77127	-0.550964	-0.31872	3.37938	3727.38	11.5033	photoNuclear
alpha	0.756987	0.598252	0.262802	6.86314	3727.38	32.8624	photoNuclear
....							

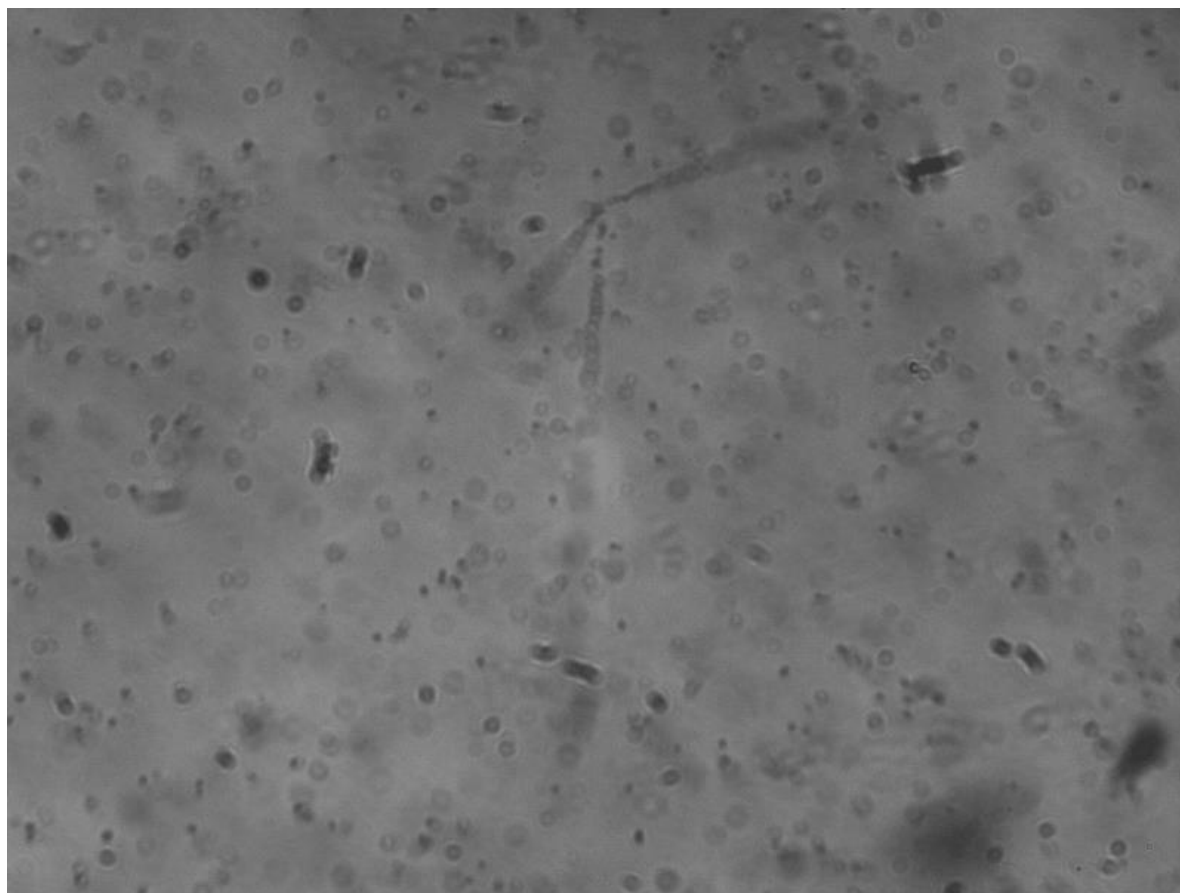
$5 \cdot 10^5$  мюонов; 39 взаимодействий  $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$



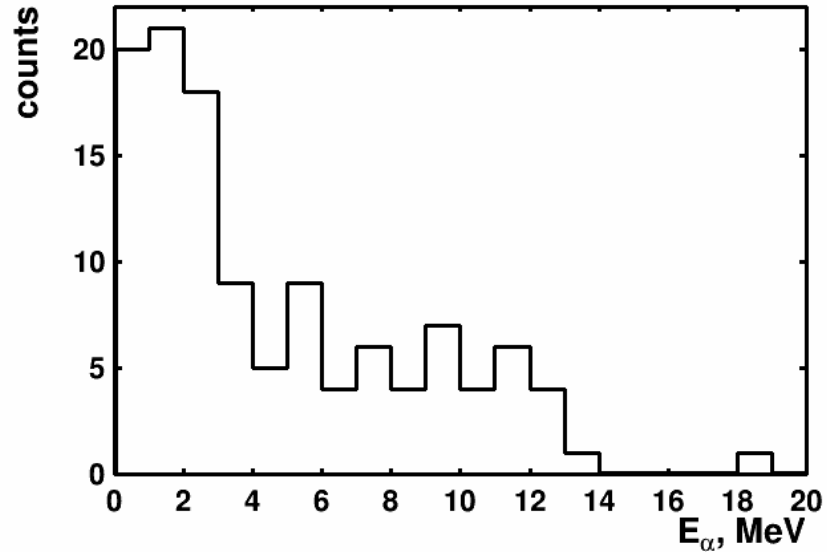
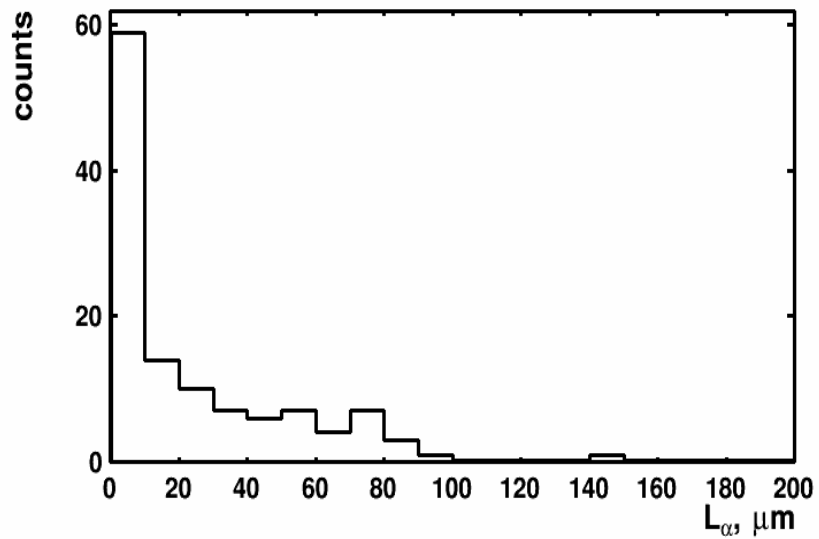
**Образцы размещались перед мишенью эксперимента COMPASS (COmmon Muon Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy, <http://wwwcompass.cern.ch/>) на расстоянии около 25 см от оси пучка (гало), где интенсивность достигала порядка  $10^6$  частиц на  $\text{см}^2$  в цикл. Образцы ЯЭ площадью  $9 \times 12 \text{ см}^2$  и толщиной  $\sim 100 \text{ мкм}$  устанавливались как вдоль пучка, так и поперек.**



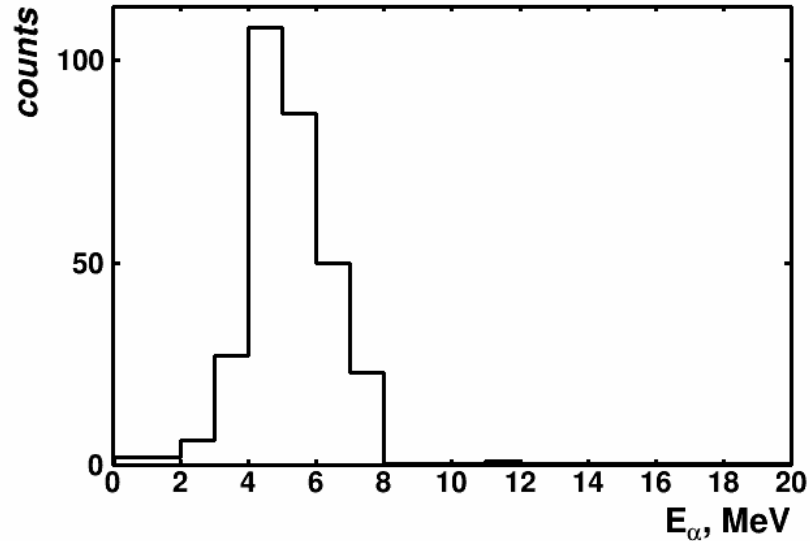
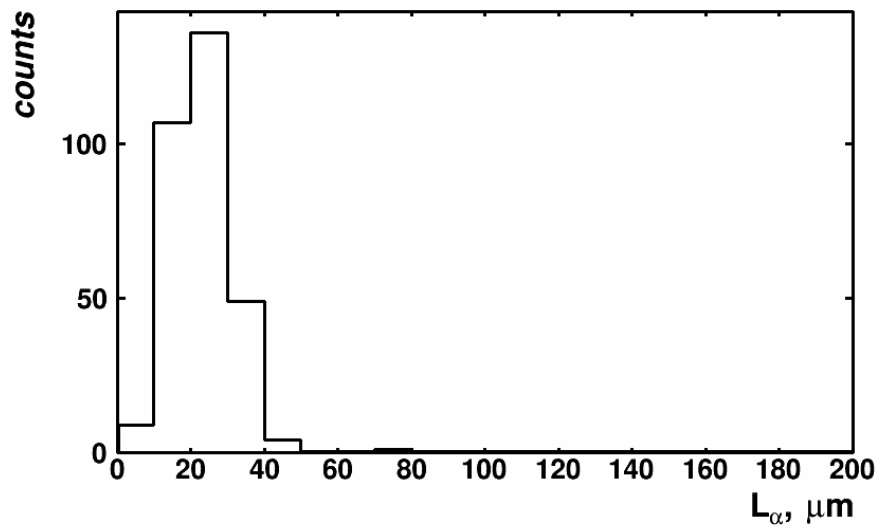
**Продуктивным для анализа оказалось поперечное облучение, длившееся 9 час. Столь продолжительное облучение возможно из-за малости сечения взаимодействия мюонов ( $\sim 10^{-6}$  барн) и малого эффекта пучковой ионизации по сравнению с продольным вариантом постановки слоев. Ограничение на длительность облучения было сделано из-за опасения перегрузки следами от взаимодействий в стеклянной подложке. В принципе эта длительность могла быть увеличена на два порядка без затруднений для анализа.**



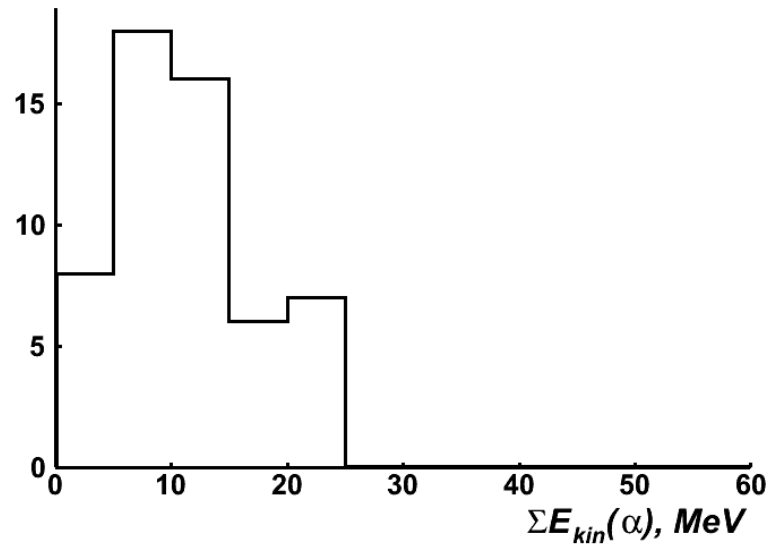
# МОДЕЛИРОВАНИЕ



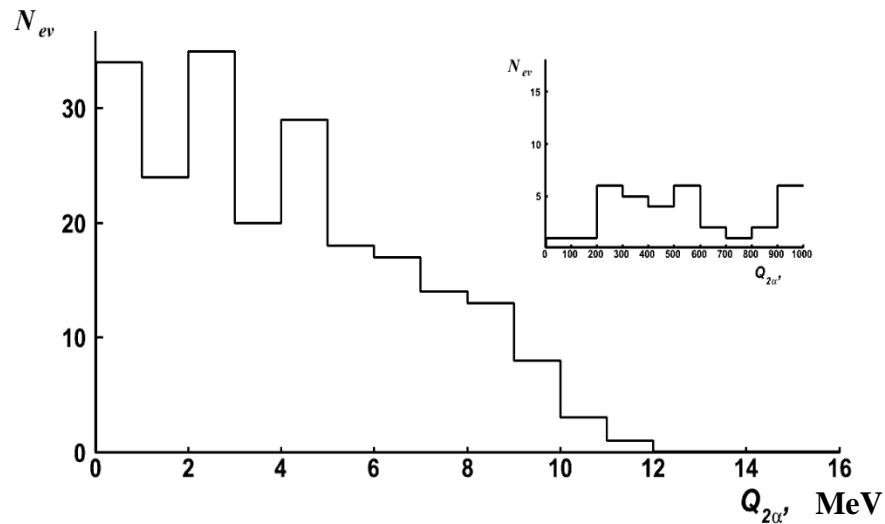
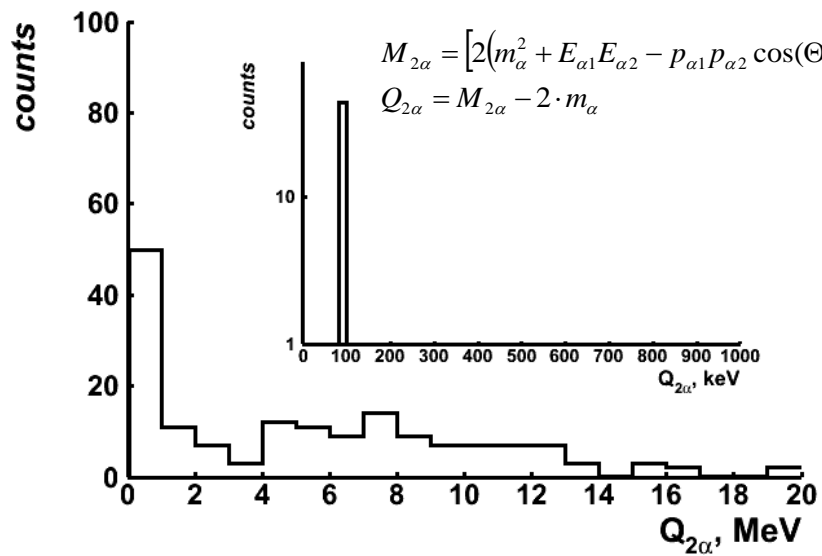
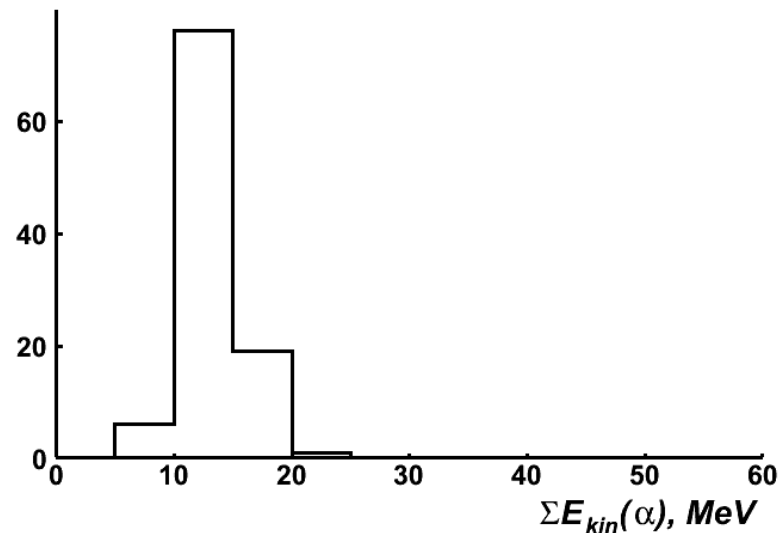
# ЭКСПЕРИМЕНТ



# МОДЕЛИРОВАНИЕ

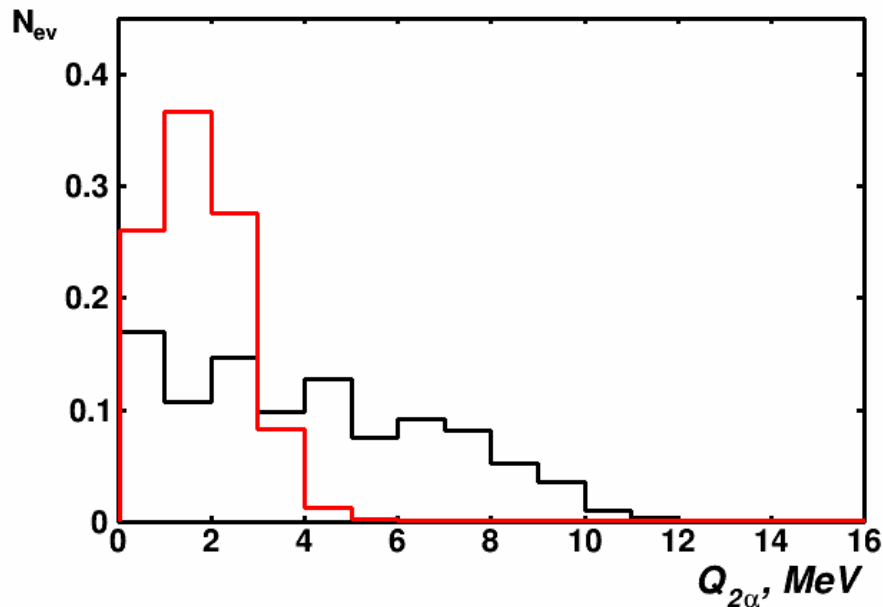


# ЭКСПЕРИМЕНТ

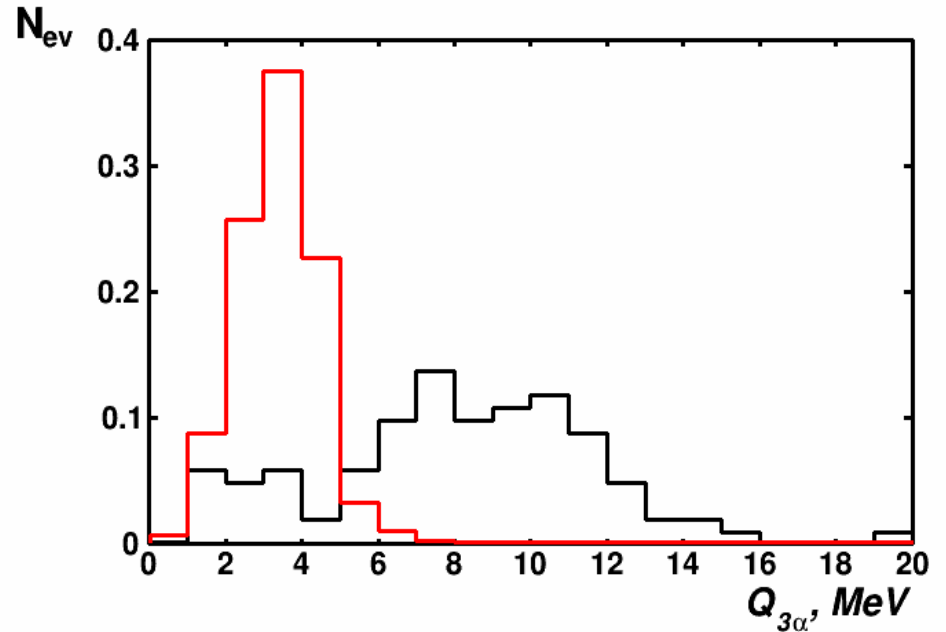




Распределение по энергии пар  $\alpha$ -частиц  $Q_{2\alpha}$  в ЯЭ, облученной мюонами (черный) и нейтронами (красный) в реакции  $n(14.1 \text{ МэВ}) + {}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha + n$



Распределение по полной энергии троек  $\alpha$ -частиц  $Q_{3\alpha}$  в ЯЭ, облученной мюонами (черный) и нейтронами (красный) в реакции  $n(14.1 \text{ МэВ}) + {}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha + n$



$$M_{2\alpha} = \left[ 2(m_\alpha^2 + E_{\alpha 1} E_{\alpha 2} - p_{\alpha 1} p_{\alpha 2} \cos(\Theta_{12})) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$Q_{2\alpha} = M_{2\alpha} - 2 \cdot m_\alpha$$

$$Q_{3\alpha} = M_{3\alpha} - 3 \cdot m_\alpha$$

# Облучение ЯЭ мюонами с энергией ~2,5 ГэВ в ИФВЭ, г. Протвино, апрель 2018

№ партии	число мюонов в ЯЭ на см <sup>2</sup>
1	$1,5 \cdot 10^5$
2	$7,0 \cdot 10^5$
3*	$8,9 \cdot 10^5$

\*Использовались эмульсии толщиной 200 мкм.



## Заключение

В докладе представлены предварительные результаты изучения мультифрагментации ядер ЯЭ (мишени) под действием ультра релятивистских мюонов;

Отдельное внимание уделено событиям кандидатам во фрагментацию  $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ ;

В настоящее время работы продолжаются. Проведено облучение фотоэмульсий на пучке мюонов в Протвино (энергия  $\sim 2,5$  ГэВ)

Данные материалы доступны на сайте сотрудничества Беккерель (<http://becquerel.jinr.ru>).

***Спасибо за внимание!***