



V ежегодная конференция
молодых ученых и специалистов
«Алушта-2016»



Применение программных пакетов FLUKA и GEANT4 для изучения методов получения ${}^6\text{He}$

Кабытаева Раушан Канапияновна

**Научный руководитель:
к.ф-м.н. Тетерев Юрий Геннадьевич**

СОДЕРЖАНИЕ:

1) Программные пакеты FLUKA & GEANT4

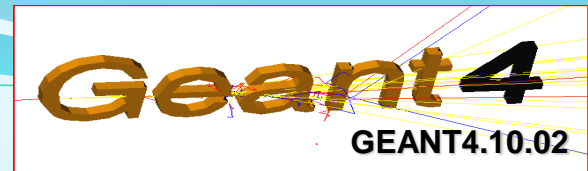
2) Применение экзотического ядра ${}^6\text{He}$

3) Результаты моделирования и проведенных экспериментов

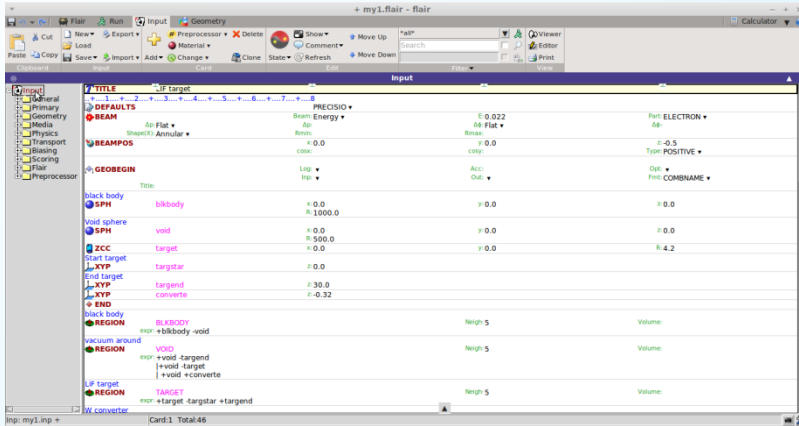
Получение ${}^6\text{He}$ в реакциях ${}^7\text{Li}({}^2\text{H}, {}^3\text{He}) {}^6\text{He}$, ${}^7\text{Li}(\gamma, p) {}^6\text{He}$ и ${}^9\text{Be}(n, \alpha) {}^6\text{He}$:

исследование зависимости выхода гелия от:

- размеров мишени и конвертера;
- энергии ускоренного пучка



Пример окна FLAIR



G4VUserDetectorConstruction

GEANT4

G4VUserPrimaryGeneratorAction

G4VUserPhysicsList

Physics Cards:
PHOTONUC

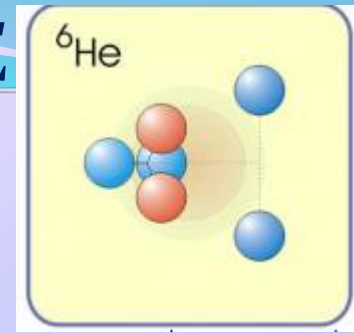
FLUKA

Transport Cards:
EMFCUT

Residual Nuclei
Cards:
RESNUCLEI

физика элементарных частиц,
ядерная физика,
проектирование ускорителей и
космических аппаратов,
исследование вопросов
дозиметрии, моделирование
процессов с участием
космических лучей и
радиотерапия.

● ПРИМЕНЕНИЕ



В ядерной физике:

- для того чтобы понять как устроено ядро
- для получения информации о свойствах экзотических ядер

Структура ${}^6\text{He}$ интересна следующим:

- аномальное повышение радиуса, которое носит название "нейтронное гало "
- ${}^6\text{He}$ является борромейским ядром

В физике слабых взаимодействий:

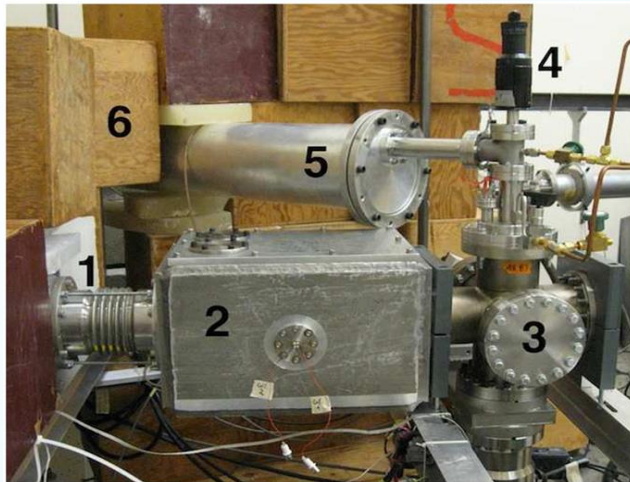
- для изучения осцилляции нейтрино и массы нейтрино

Ядро ${}^6\text{He}$ является идеальным кандидатом для изучения слабого взаимодействия, так как:

- период полураспада ${}^6\text{He}$ составляет 807мс, который является достаточно удобным.
- ядро ${}^6\text{He}$ – это простая система нескольких частиц, для которых неэмпирические расчеты могут быть выполнены с высокой точностью.
- гелий - благородный газ и эффекты, обусловленные химическими взаимодействиями, сводятся к минимуму.

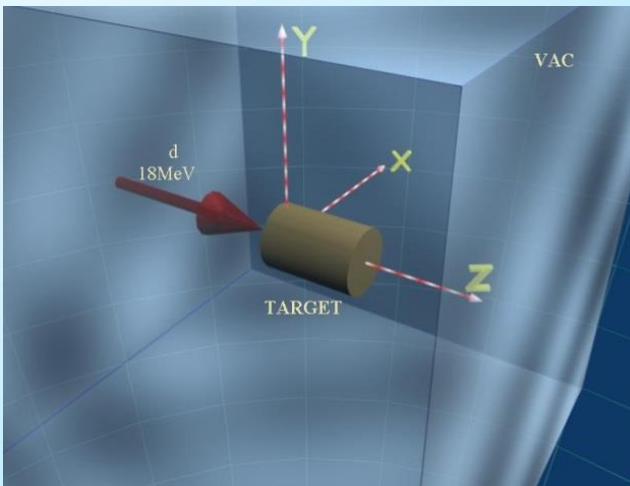
GEANT4 SIMULATIONS

Получение ${}^6\text{He}$ в реакции ${}^7\text{Li}({}^2\text{H}, {}^3\text{He})$

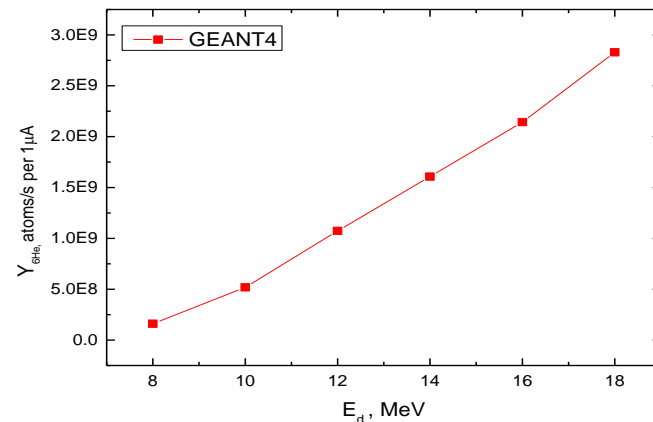
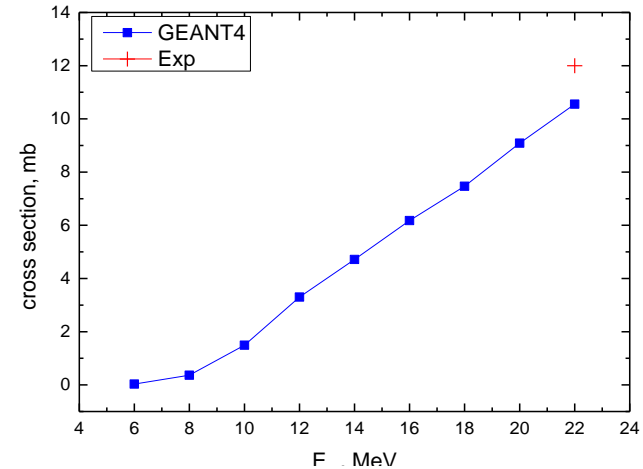


Настройка литиевой мишени на линии пучка.

- 1-вакуумный корпус входящего пучка дейтрона;
- 2- коллимация пучка; 3-литиевая мишень;
- 4- механическая обработка расплавленного лития;
- 5-труба для извлечения ${}^6\text{He}$; 6- нейтронная защита.



Сечение реакции ${}^7\text{Li}({}^2\text{H}, {}^3\text{He}){}^6\text{He}$ и зависимость выхода от энергии дейтрона



$$Y_{\text{GEANT4}} = 2.8 \cdot 10^9 \text{ ядер/с} \cdot 1 \mu\text{A.}$$

Получение радиоактивного пучка ионов ${}^6\text{He}^+$ на различных установках

Город, страна где расположена установка	Установка	Интенсивность пучка, атомов/с мкА	Энергия ускоренных частиц, МэВ
Лювэн-ла-Неф (Бельгия)	ARENAS	10^6	30
Дубна (Россия)	DRIBs	$5 \cdot 10^7$	32
Сиэтл (США)	Генератор Ван де Граафа	10^9	18

Микротрон МТ-25



ЭЦР источник

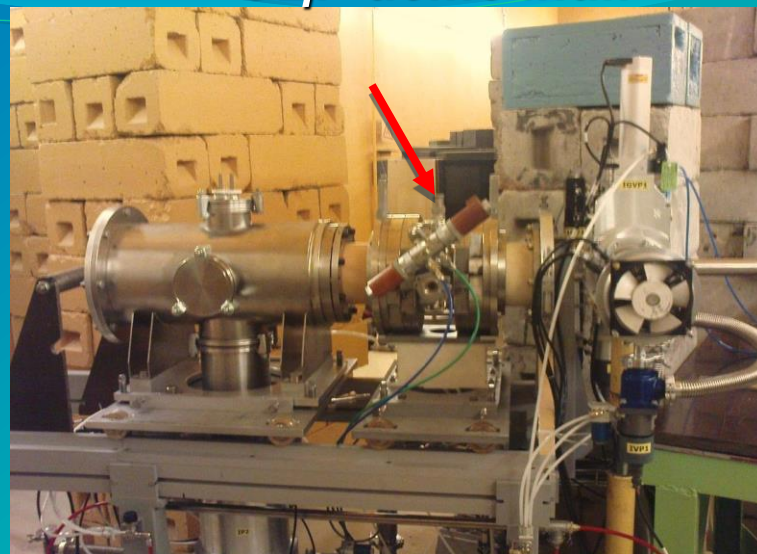
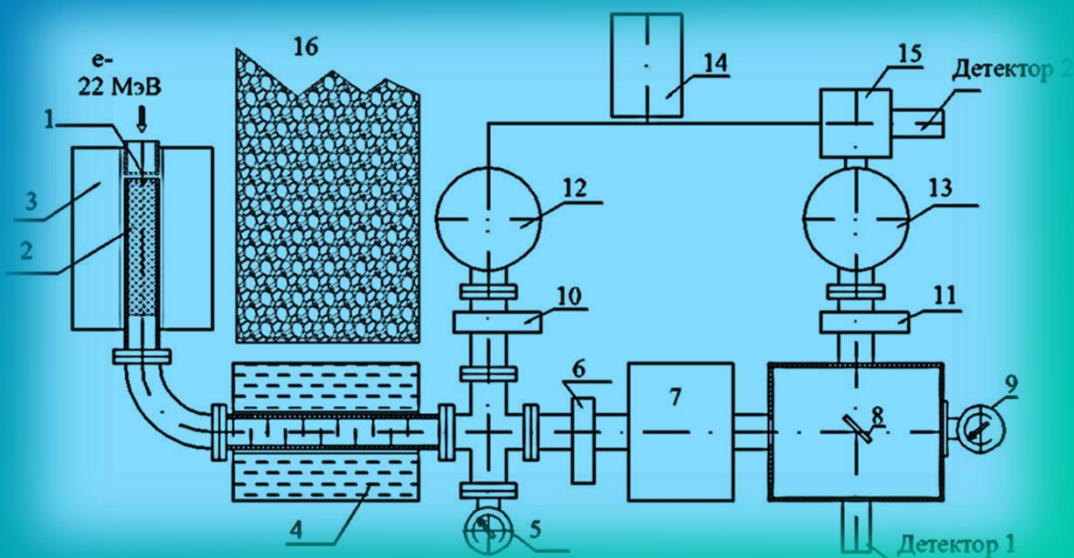
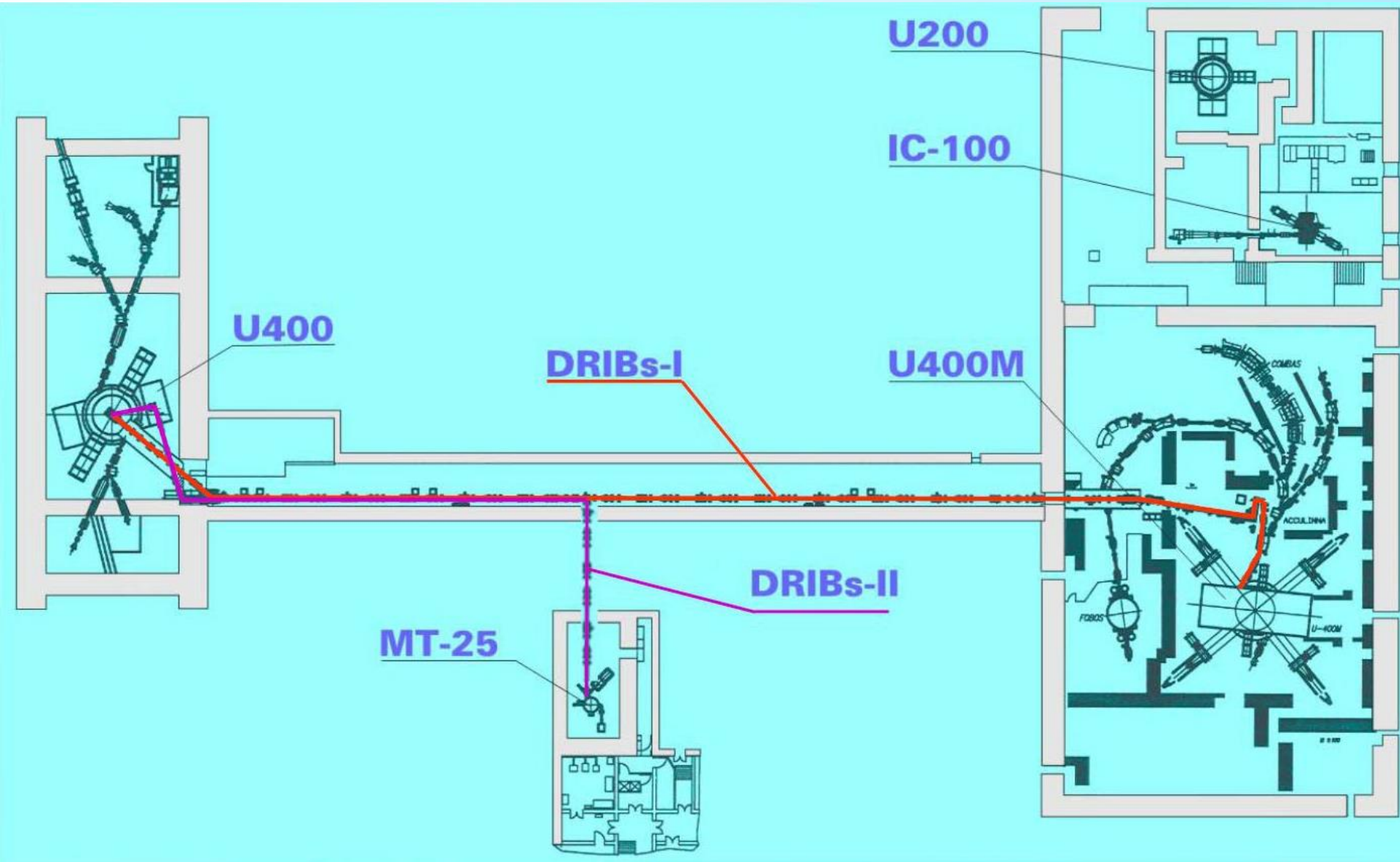


Схема экспериментальной установки



1—тормозная мишень,
2- металлический сосуд, заполненный облучаемым веществом, 3- трубчатая печь, 4- криогенная ловушка с жидким азотом, 5 и 9 – вакуумметры, 6, 10 и 11- вакуумные шиберы, 7- ЭЦР источник, 8- стоппер пучка ионов ${}^6\text{He}^+$, 12 и 13- турбомолекулярные насосы, 14- форвакуумный насос, 15- буферный объем, 16 – защитная стенка из тяжелого бетона.

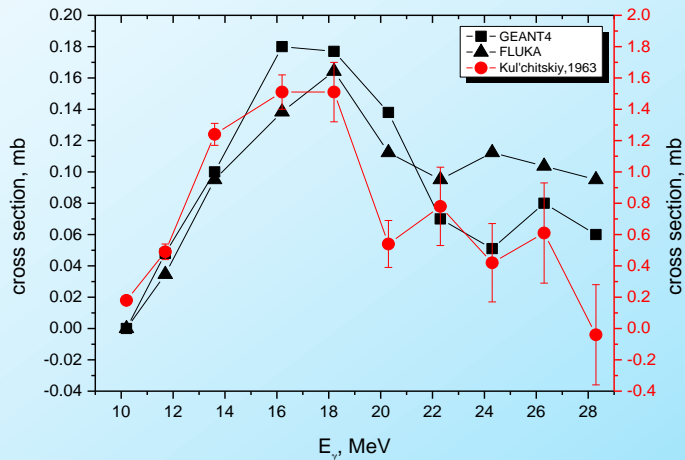
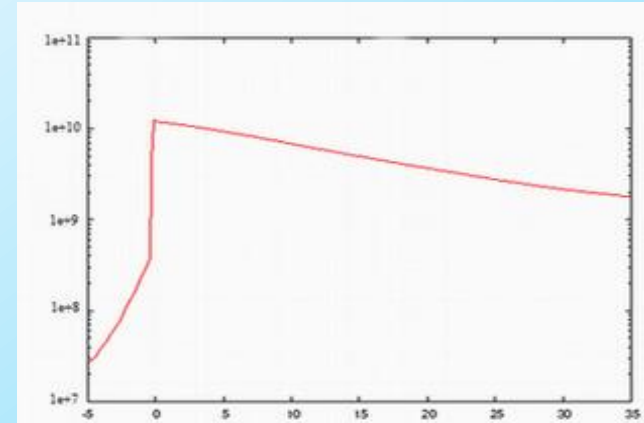
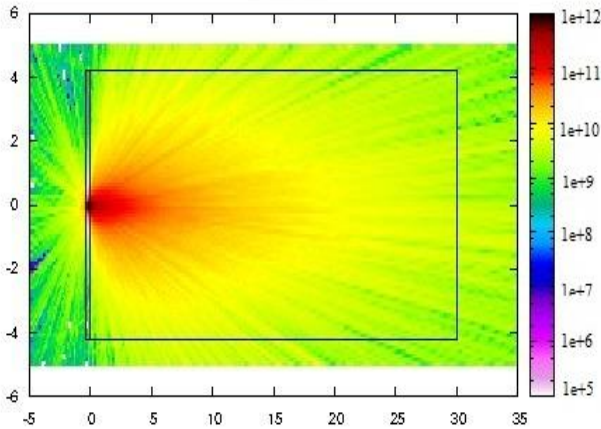
Ускорительный комплекс DRIBs



FLUKA & GEANT4 SIMULATIONS

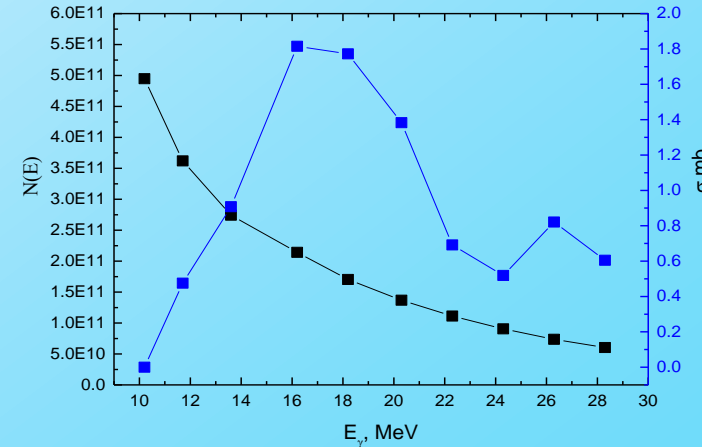
Получение ${}^6\text{He}$ в реакции ${}^7\text{Li}(\gamma, p)$

Флюенс фотона на плоскости XZ [фотонов/см²/с] с электронным пучком энергии 22 МэВ и интенсивностью $I = 20 \mu\text{A}$ (мишень LiF с плотностью $\rho = 1.0 \text{ г/см}^3$)



$$N = N_0 \cdot \sigma \cdot n_A$$

$$n_A = \frac{\rho_{\text{LiF}} \cdot N_A \cdot d}{A}$$

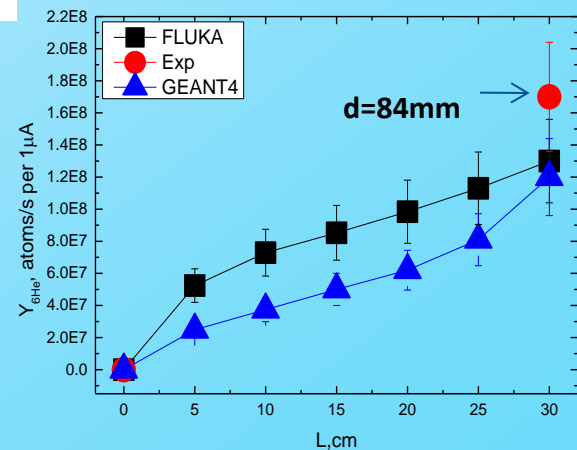
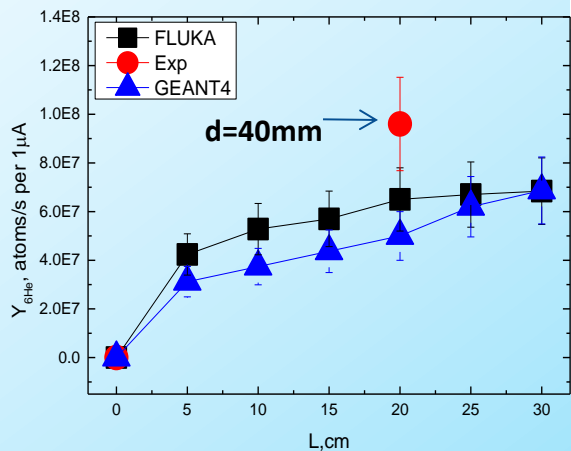
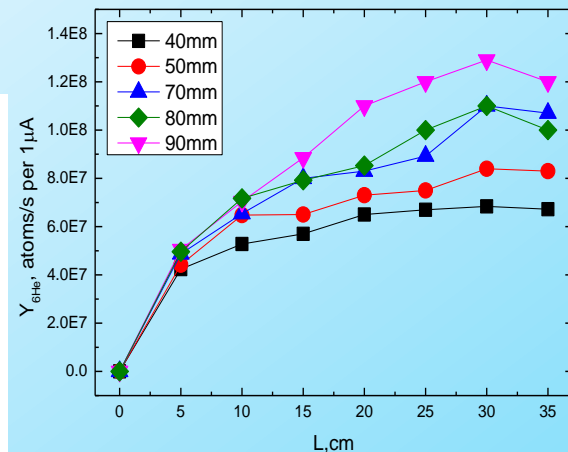
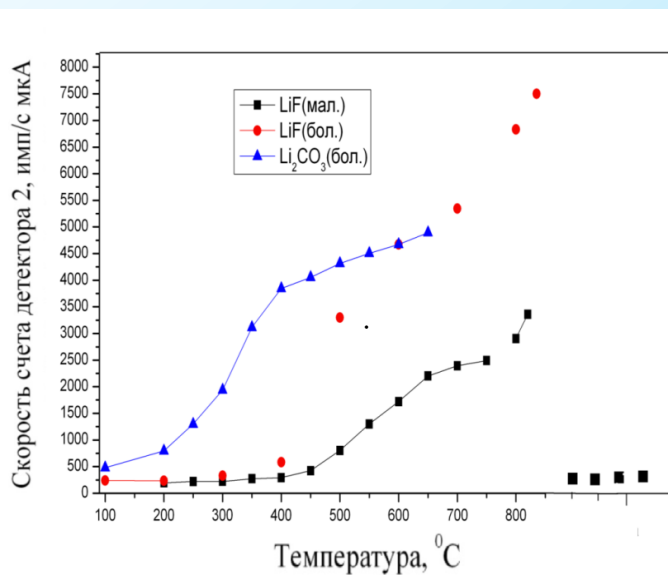
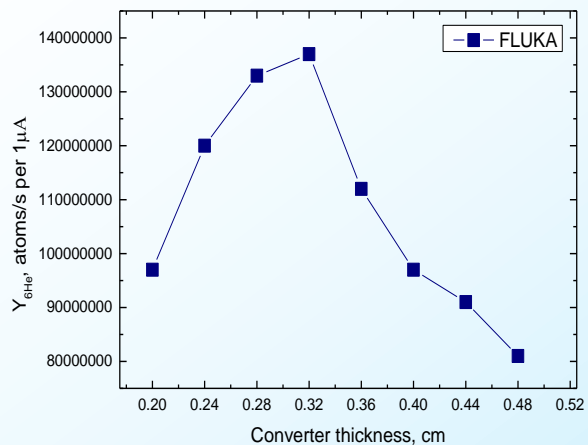


сечение реакции ${}^7\text{Li}(\gamma, p){}^6\text{He}$ и спектр фотонов

FLUKA, GEANT4 SIMULATIONS and Experimental results

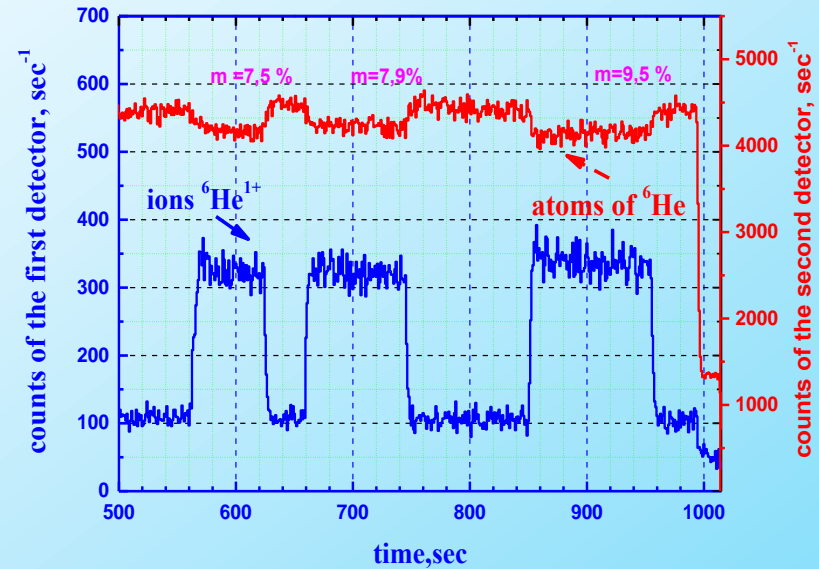
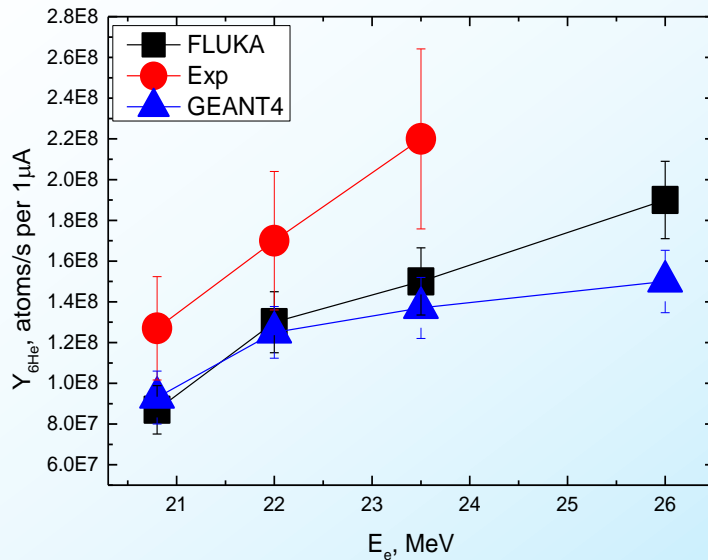
Получение ${}^6\text{He}$ в реакции ${}^7\text{Li}(\gamma, p)$

Зависимость выхода ${}^6\text{He}$ от толщины конвертера, температуры, диаметра и длины мишени

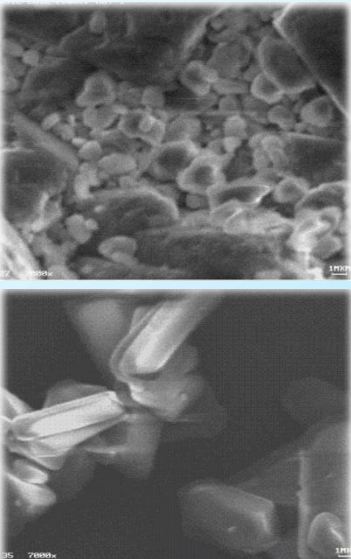


FLUKA, GEANT4 SIMULATIONS and Experimental results

Получение ${}^6\text{He}$ в реакции ${}^7\text{Li}(\gamma, p)$



Экспериментально измерена зависимость выхода гелия в диапазоне энергий от 20,8 МэВ до 23,5 МэВ. В данном диапазоне выход гелия увеличивался линейно, и увеличение составило 54%.

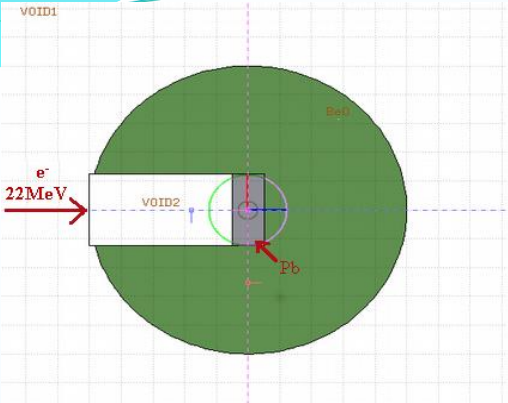


Диаметр d и длина l сосуда с LiF	Выход ${}^6\text{He}$, ядер/с $\cdot 1\mu\text{A}$	
	FLUKA и GEANT4	Exp
d=8.4см, l=30см	$Y_{\text{FLUKA}} = (1.3 \pm 0.14) \cdot 10^8$ $Y_{\text{GEANT4}} = (1.2 \pm 0.14) \cdot 10^8$	$(1.7 \pm 0.46) \cdot 10^8$
d=4см, l=20см	$Y_{\text{FLUKA}} = (6.5 \pm 0.1) \cdot 10^7$ $Y_{\text{GEANT4}} = (4.5 \pm 0.1) \cdot 10^7$	$(9.6 \pm 1.4) \cdot 10^7$



Получение ${}^6\text{He}$ в реакции ${}^9\text{Be}(n, \alpha)$

геометрия эксперимента



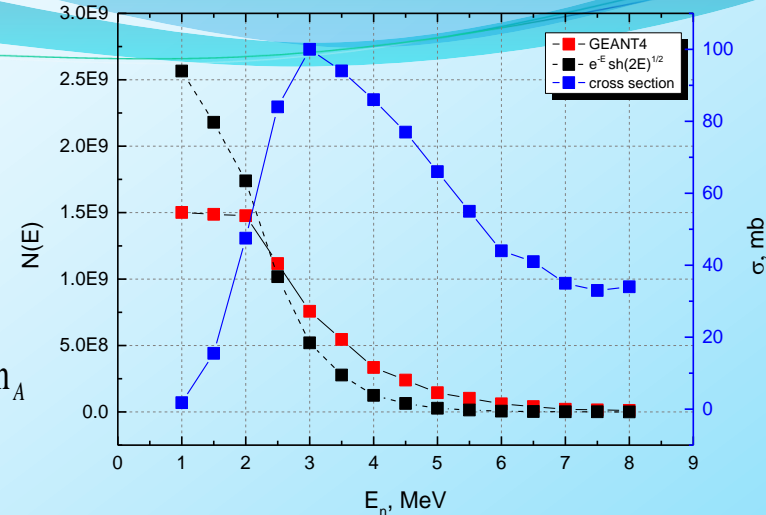
$$N_0(E) = e^{-E} \cdot sh\sqrt{2E}$$

$$N = N_0^{-\Sigma_t} \cdot x$$

$$\Sigma_t = \sigma_t \cdot n_A$$

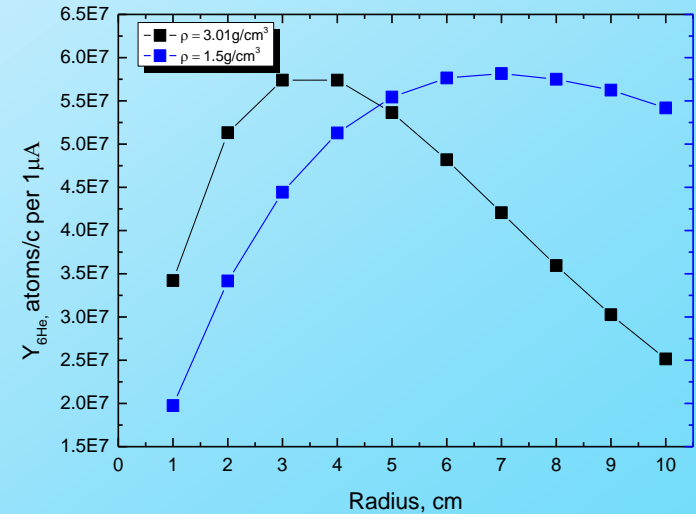
$$n_A = \frac{\rho_{\text{BeO}} \cdot N_A}{A} \cdot R$$

$$Y_{6\text{He}} = \int_0^{E_{\text{max}}} \sigma(E) N(E) dE \cdot n_A = \sum_{i=0}^n \sigma(E_i) N(E_i) \Delta E \cdot n_A$$



Спектр нейтронов и сечение реакции ${}^9\text{Be}(n, \alpha) {}^6\text{He}$

Радиус, см	Выход ${}^6\text{He}$, ядер/с · 1 μA	
	Плотность мишени BeO , $\rho=3.01\text{г/см}^3$	Плотность мишени BeO , $\rho=1.5\text{г/см}^3$
1	$3.42109 \cdot 10^7$	$1.97576 \cdot 10^7$
2	$5.13164 \cdot 10^7$	$3.41695 \cdot 10^7$
3	$5.74048 \cdot 10^7$	$4.44276 \cdot 10^7$
4	$5.74048 \cdot 10^7$	$5.12904 \cdot 10^7$
5	$5.36358 \cdot 10^7$	$5.54442 \cdot 10^7$
6	$4.81852 \cdot 10^7$	$5.76475 \cdot 10^7$
7	$4.20606 \cdot 10^7$	$5.81532 \cdot 10^7$
8	$3.59505 \cdot 10^7$	$5.7503 \cdot 10^7$
9	$3.0268 \cdot 10^7$	$5.62388 \cdot 10^7$
10	$2.51508 \cdot 10^7$	$5.418 \cdot 10^7$



Зависимость выхода ${}^6\text{He}$ от радиуса и плотности мишени BeO

*Fernandes S., *Submicro- and Nanostructured Porous Materials for Production of High- Intensity Exotic Radioactive Ion Beams*, PhD Thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland (2010).

Выводы:

- 1) В реакции ${}^7\text{Li}(d, {}^3\text{He}) {}^6\text{He}$ при ускоренных дейтронах на генераторе Ван де Граафа до энергии 18 МэВ, выход ${}^6\text{He}$ составил $Y_{\text{GEANT}_4} = 2.8 \cdot 10^9$ ядер/с.
- 2) Оптимальная толщина конвертера в реакции ${}^7\text{Li}(\gamma, p) {}^6\text{He}$ была определена путем сравнения выхода ${}^6\text{He}$ из различных толщин конвертера. С помощью этого метода, была установлена оптимальная толщина конвертера, которая составила 0.32 см.

Были установлены зависимости выхода ${}^6\text{He}$ от энергии электронов, диаметра и длины мишени.

В качестве мишени использована соль LiF с плотностью $\rho = 1.0 \text{ г/см}^3$, который был загружен в цилиндрический сосуд внутренним диаметром 84 мм на длину 300 мм. Выход ${}^6\text{He}$, который был получен с помощью программных пакетов FLUKA, GEANT₄ составил $Y_{\text{FLUKA}} = (1.3 \pm 0.14) \cdot 10^8$ ядер/с· $\mu\text{А}$, $Y_{\text{GEANT}_4} = (1.2 \pm 0.14) \cdot 10^8$ ядер/с· $\mu\text{А}$ и экспериментально в ЛЯР, на микротроне МТ-25 $Y_{\text{Exp}} = (1.7 \pm 0.46) \cdot 10^8$ ядер/с· $\mu\text{А}$.

- 3) В качестве мишени использован BeO с плотностью $\rho_1 = 3.01 \text{ г/см}^3$ и $\rho_2 = 1.5 \text{ г/см}^3$, выход ${}^6\text{He}$ при плотности оксида бериллия 1.5 г/см^3 и радиусе 7 см составил $Y_{{}^6\text{He}} = 5.8 \cdot 10^7$ ядер/с, что примерно в 2 раза меньше, чем выход ${}^6\text{He}$ в реакции ${}^7\text{Li}(\gamma, p) {}^6\text{He}$.

!!! Преимуществом использования электронного пучка является его низкая стоимость по сравнению с ионными пучками.

Реакция	Выход ${}^6\text{He}$, ядер/с· $\mu\text{А}$		
	FLUKA	GEANT ₄	Экспериментальные данные
${}^7\text{Li}(d, {}^3\text{He}) {}^6\text{He}$ ($E_d = 18 \text{ МэВ}$)		$(2.8 \pm 1.23) \cdot 10^9$	$6.2 \cdot 10^8$
${}^7\text{Li}(\gamma, p) {}^6\text{He}$ ($E_e = 22 \text{ МэВ}$)	$(1.3 \pm 0.14) \cdot 10^8$	$(1.2 \pm 0.14) \cdot 10^8$	$(1.7 \pm 0.46) \cdot 10^8$
${}^9\text{Be}(n, \alpha) {}^6\text{He}$ ($E_e = 22 \text{ МэВ}$)	$5.8 \cdot 10^7$		

1) <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/312/5/052013>

M. Lebois and P. Bricault, Simulations for the future converter of the e-linac for the TRIUMF ARIEL facility, Proceedings of the International Nuclear Physics Conference 2010, TRIUMF, Vancouver, BC, July 4-9, 2010, Journal of Physics : Conference Series 312, 052013, 2011.

2) http://www.fluka.org/web_archive/earchive/new-fluka-discuss/5563.html

New Developments in FLUKA F. Cerutti¹, A. Ferrari¹, A. Mairani², P.R. Sala^{0 1} European Laboratory for Particle Physics (CERN), CH-1211 Geneva 23, Switzerland ⁰ INFN, Via Celoria 16, 20133, Milan, Italy ² CNAO foundation, Pavia, Italy

3) <http://geant4.web.cern.ch/geant4/UserDocumentation/UsersGuides/PhysicsReferenceManual/fo/PhysicsReferenceManual.pdf>

Fermi break-up simulation for light nuclei

For light nuclei the values of excitation energy per nucleon are often comparable with nucleon binding energy. Thus a light excited nucleus breaks into two or more fragments with branching given by available phase space. To describe a process of nuclear disassembling the so-called Fermi breakup model is formulated [1], [2], [3], [4]. This statistical approach was first used by Fermi [1] to describe the multiple production in high energy nucleon collision. The GEANT4 Fermi break-up model is capable to predict final states as result of an excited nucleus with $Z < 9$ and $A < 17$ statistical break-up.

[1] Fermi E., Prog. Theor. Phys. 5 1570 (1950). [2] Kretschmar M. Annual Rev. Nucl. Sci. 11 1 (1961). [3] Epherre M., Gradsztajn E., J. Physique 18 48 (1967). [4] Bonorf J. P., Botvina A. S., Iljinov A. S., Mishustin I. N., Sneppen K., Phys. Rep. 257 133 (1995).

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ



Кабытаева Раушан Канапияновна

Тема доклада: Применение программных пакетов FLUKA и GEANT4 для изучения методов получения ${}^6\text{He}$