



Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики
высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского
центра «Курчатовский институт»
(НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ)



Экспериментальное определение сечений реакции $^{12}\text{C}(^{12}\text{C},\text{X})^{11}\text{C}$ для калибровки монитора интенсивности выведенного пучка ионов углерода клинически значимых энергий

*А. Г. Васильева, М. Ю. Костин, В. А. Пикалов,
О. В. Суманеев, А. А. Янович*



«ЯДРО-2025», Санкт-Петербург

- В НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ освоен медленный вывод пучка ускоренных ионов углерода промежуточных энергий (200-450 МэВ/нуклон) из ускорительного комплекса У-70 в экспериментальный зал.
- Проводятся доклинические и радиобиологические исследования совместно со специалистами МРНЦ им. А.Ф. Цыба (Обнинск), ИТЭБ РАН (Пущино) и ГНЦ РФ - ИМБП РАН (Москва) и другими институтами.
- Ведутся работы по созданию первого в России экспериментально-клинического комплекса ионной лучевой терапии (ЭКЦ ИЛТ) на действующем ускорительном комплексе У-70 и работы по разработке методики использования ионов углерода в медицинских целях.





- Одна из основных задач для ионной лучевой терапии – точное измерение дозы ионизирующего излучения, полученной опухолью и здоровой тканью. Для медицинского применения точность подведения дозы к объему облучаемой опухоли, должна быть не хуже 5%. Для этого нужно как можно точнее знать параметры подводимого пучка. В качестве мониторов пучка наибольшее распространение в ионно-лучевой терапии получили ионизационные камеры.
- Особое внимание уделяется разработке методик абсолютной калибровки ионизационных камер для уменьшения неопределенностей в измерении дозы или интенсивности.
- Разработана методика калибровки ионизационных камер и датчиков обратной связи выведенного пучка ионов углерода клинически значимых энергий (150-450 МэВ/нуклон) активационными детекторами.



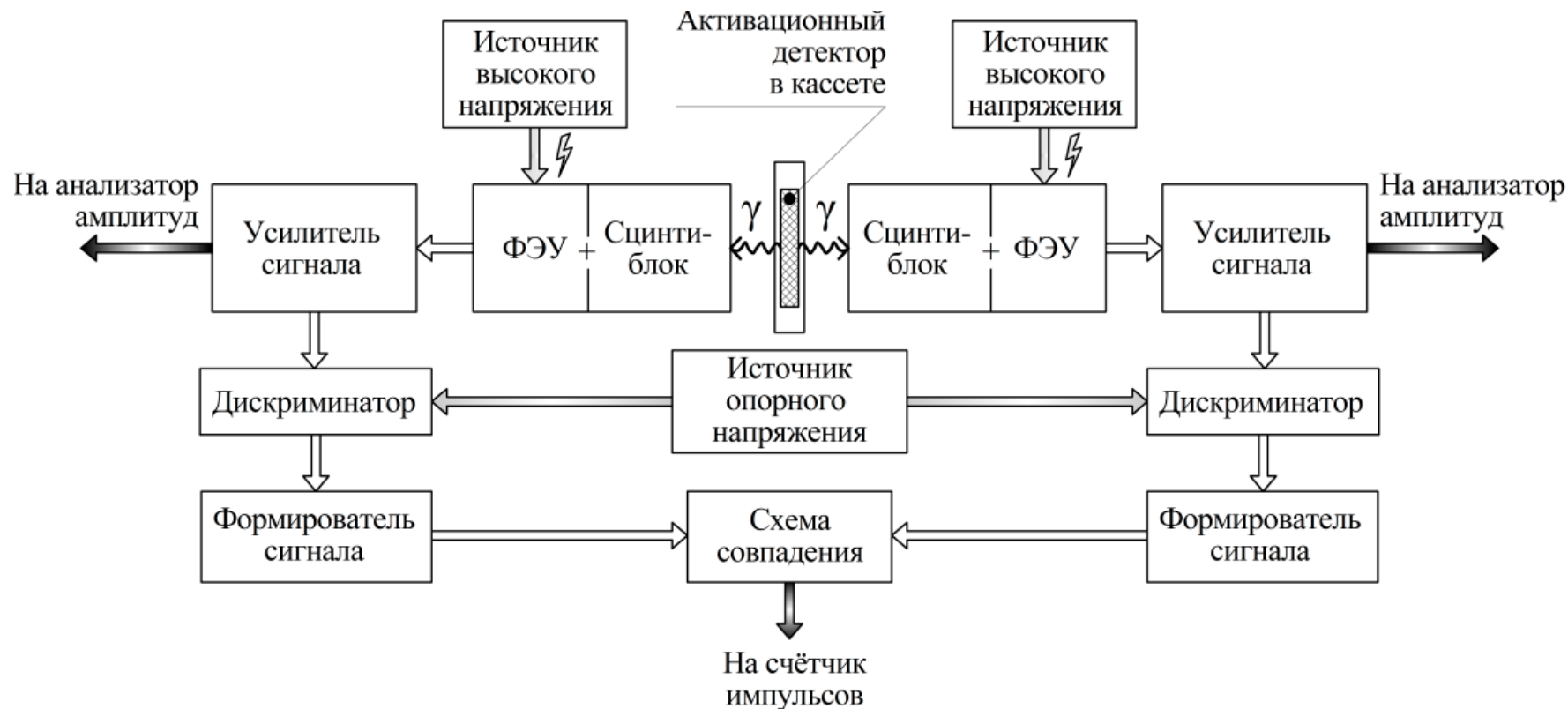
Существует значительный опыт применения активационных детекторов на ускорителях.

Использование активационного анализа для диагностики интенсивности пучков частиц на высокоэнергетических ускорителях в целом имеет ряд преимуществ перед другими методами:

- ✓ линейность в широком диапазоне интенсивностей;
- ✓ отсутствие зависимости от временной структуры пучка;
- ✓ высокая радиационная стойкость активационных детекторов;
- ✓ изотропность детекторов;
- ✓ сравнительно несложная и недорогая аппаратура для обработки детекторов;



- Для работы с активационными детекторами на протонных пучках широко используются реакции $^{12}\text{C}(\text{p},\text{pn})^{11}\text{C}$, $^{27}\text{Al}(\text{p},3\text{pn})^{24}\text{Na}$, $^{27}\text{Al}(\text{p},3\text{p}3\text{n})^{22}\text{Na}$ и некоторые другие, для которых сечения измерены с хорошей точностью в широком диапазоне энергий протонов.
- Для работы с пучком ускоренных ядер удобно использовать реакцию $^{12}\text{C}(^{12}\text{C},\text{X})^{11}\text{C}$.
- Изотоп ^{11}C имеет период полураспада 20,34 мин.
- При измерении активности мишени спустя 5–10 минут после окончания облучения можно считать, что кроме изотопа ^{11}C в мишени нет других радиоактивных ядер.
- Изотоп ^{11}C углерода представляет собой практически 100% β^+ -излучатель.
- Для измерения активности после облучения детекторов из чистого углерода удобно использовать радиометрическую установку, работающую по принципу γ - γ -совпадений.



Блок-схема радиометрической установки, работающей по принципу γ - γ -совпадений

Сцинтилляторы: NaI(Tl) (время высвечивания 240 нс) Ø200 мм, длина 100 мм.

Фотоэлектронные умножители: ФЭУ-49 (рабочий Ø фотокатода 170 мм).

В случае, когда время облучения активационного детектора много меньше периода полураспада образующегося изотопа, для расчёта числа частиц I , прошедших через мишень, можно использовать формулу:

$$I = \frac{C_0 \cdot \tau}{N_{\text{я}} \cdot d \cdot \sigma \cdot \varepsilon}; \quad (1)$$

где C_0 – активность изотопа мишени на момент конца облучения (Бк),

τ – постоянная распада (с), рассчитываемая по формуле (2),

$N_{\text{я}}$ – число ядер в единице объема мишени (см^{-3}), рассчитываемое по формуле (3),

d – толщина мишени (см),

σ – сечение ядерной реакции (см^2),

ε – эффективность регистрации радиометрической установки.

$$\tau = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}; \quad (2)$$

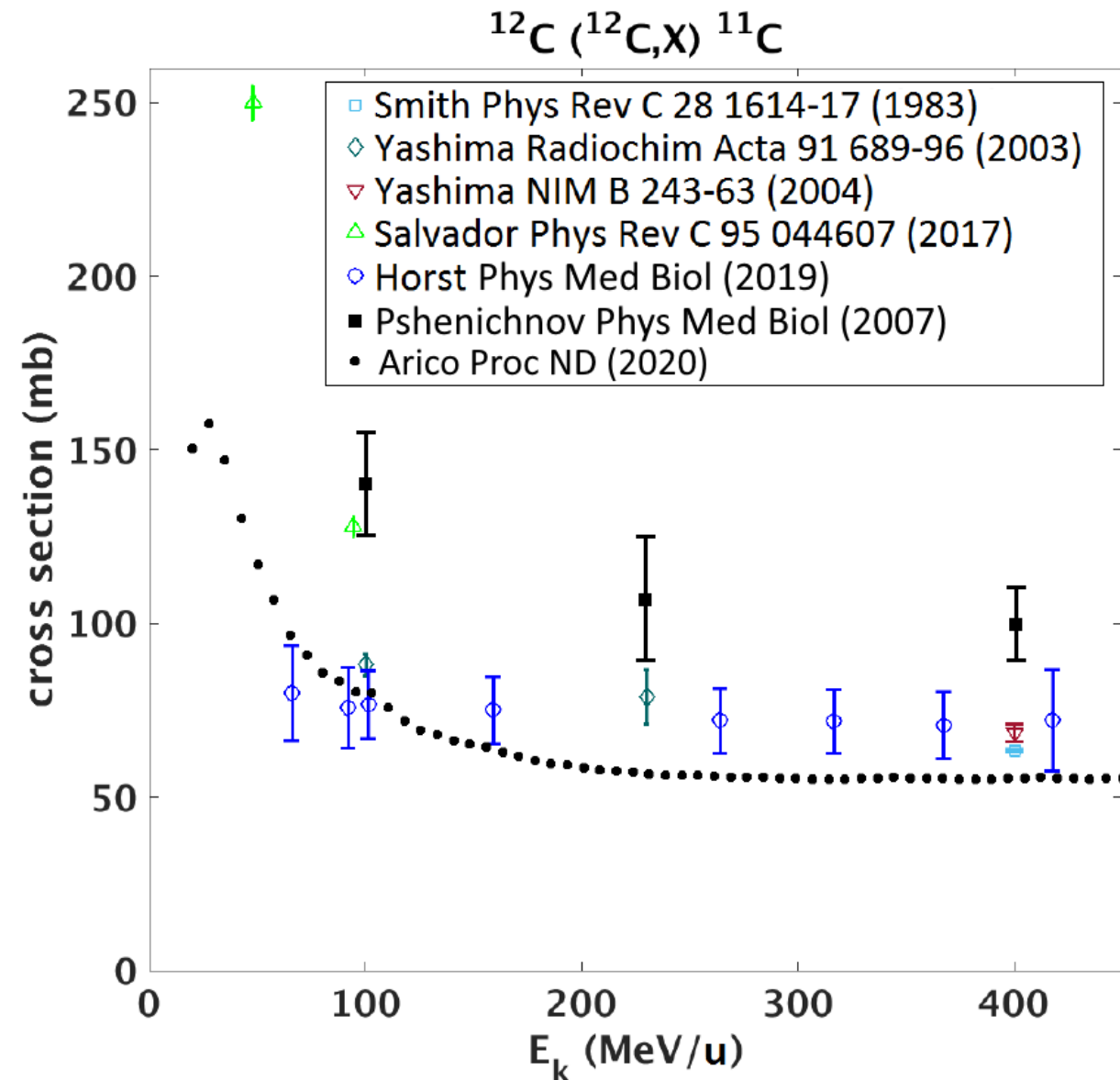
$$N_{\text{я}} = \left(\frac{\rho}{A} \right) \cdot N_A; \quad (3)$$

где $T_{1/2}$ – период полураспада изотопа мишени (с),

ρ – плотность материала мишени (г/см^3),

A – атомная масса материала мишени (а. е. м.),

N_A – число Авогадро (моль^{-1})



Сечение образования ^{11}C при взаимодействии пучков ионов углерода с углеродными мишенями в зависимости от энергии. Черные точки — моделирование FLUKA, черные квадраты — моделирование GEANT4, пустые символы — экспериментальные данные (модифицировано по [2])

Существует значительная разница как между экспериментальными данными о сечениях, так и между экспериментальными данными и компьютерным моделированием!

[2] Arico G. et al. Benchmarking of FLUKA production cross sections of positron emission tomography isotopes for in-vivo range verification in hadron therapy // Proc. ND 2019. May 2019, Beijing. 2020. P. 24001–24005.



В октябре и декабре 2024-го года на ускорительном комплексе У-70 во время углеродного сеанса были проведены два эксперимента по измерению сечения реакции $^{12}\text{C}(^{12}\text{C},\text{X})^{11}\text{C}$ на энергии 450 МэВ/нуклон и 402,5 МэВ/нуклон.

В случае, когда время облучения много меньше периода полураспада образующегося радионуклида, для расчета сечения ядерной реакции σ (см²) можно использовать формулу:

$$\sigma = \frac{C_0 \cdot \tau}{N_{\text{я}} \cdot d \cdot I \cdot \varepsilon};$$

где C_0 – активность изотопа мишени на момент конца облучения (Бк);

τ – постоянная распада (с);

$N_{\text{я}}$ – число ядер в единице объема мишени (см⁻³);

d – толщина мишени (см);

I – число частиц (ядер углерода), прошедших через мишень;

ε – эффективность регистрации радиометрической установки.

$$\tau = \frac{T_{1/2}}{\ln 2};$$

$$N_{\text{я}} = \left(\frac{\rho}{A}\right) \cdot N_A;$$

где $T_{1/2}$ – период полураспада изотопа мишени, ρ – плотность материала мишени (г/см³), A – атомная масса материала мишени (а. е. м.), N_A – число Авогадро (моль⁻¹).

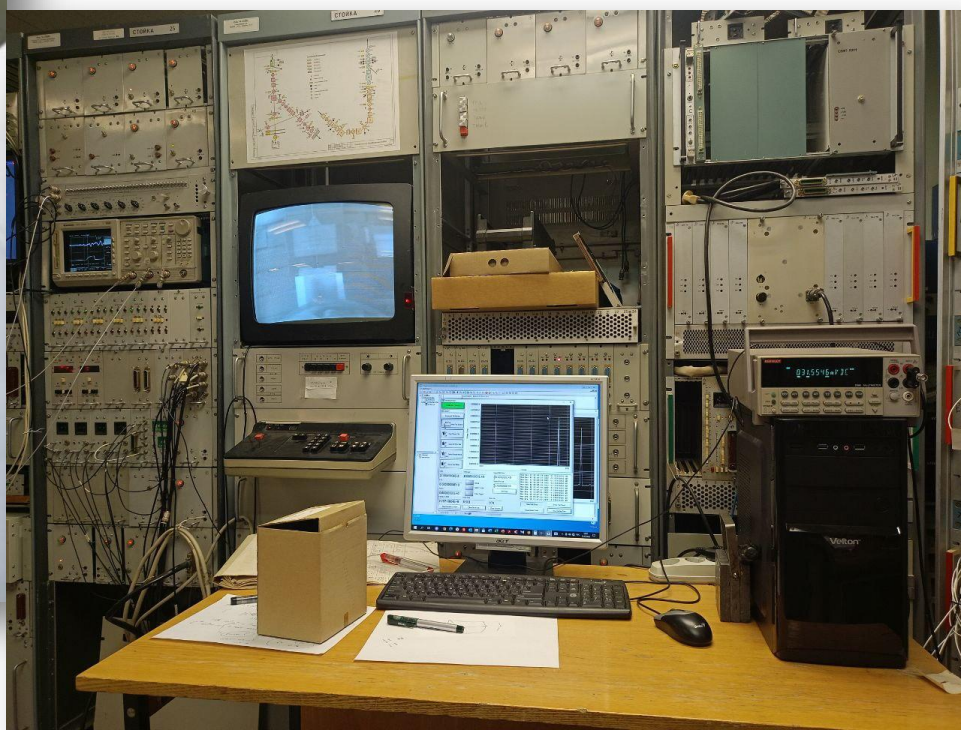
Измерение сечений реакции $^{12}\text{C}(^{12}\text{C},\text{X})^{11}\text{C}$



Мишень: активационный детектор - диск из графита высокой чистоты (99,99%) плотностью $1,719 \text{ г/см}^3$, диаметром 120 мм и толщиной 5,37 мм.



Облучение (на У-1,5 в углеродной моде): 1 банч ионов углерода энергии 450 МэВ/нуклон (402,5 МэВ/нуклон). Длительность банча 100 нс, сброс через каждые 9 с.



Измерение сечений реакции $^{12}\text{C}(^{12}\text{C},\text{X})^{11}\text{C}$

11



✓ Октябрь 2024 г.

✓ Декабрь 2024 г.

Энергия - 450 МэВ/нуклон

Энергия – 402,5 МэВ/нуклон

Интенсивность - $4,23 \cdot 10^9$ ионов C^{+6}

Интенсивность - $1,37 \cdot 10^9$ ионов C^{+6}

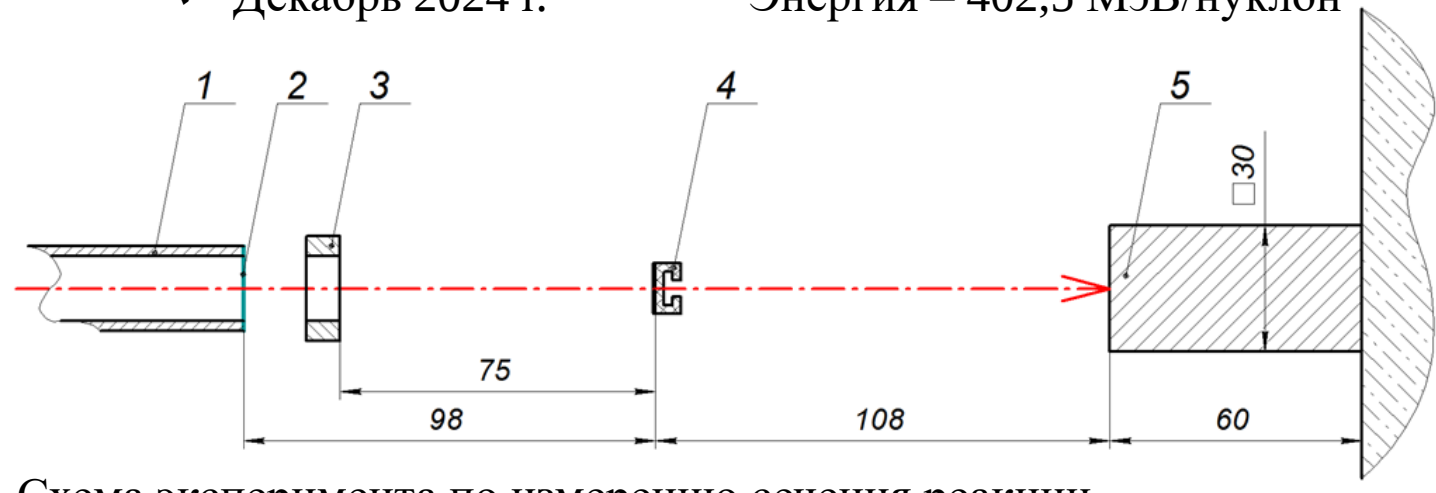


Схема эксперимента по измерению сечения реакции $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, \text{X})^{11}\text{C}$ в реальной геометрии (вид сверху).

Красная штрихпунктирная линия - направление пучка;

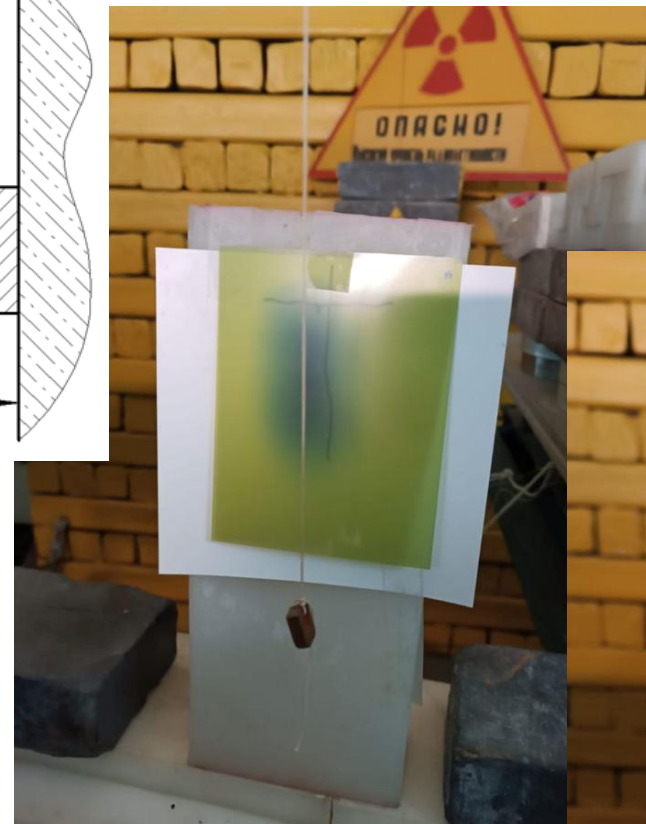
1 – вакуумная камера ионопровода;

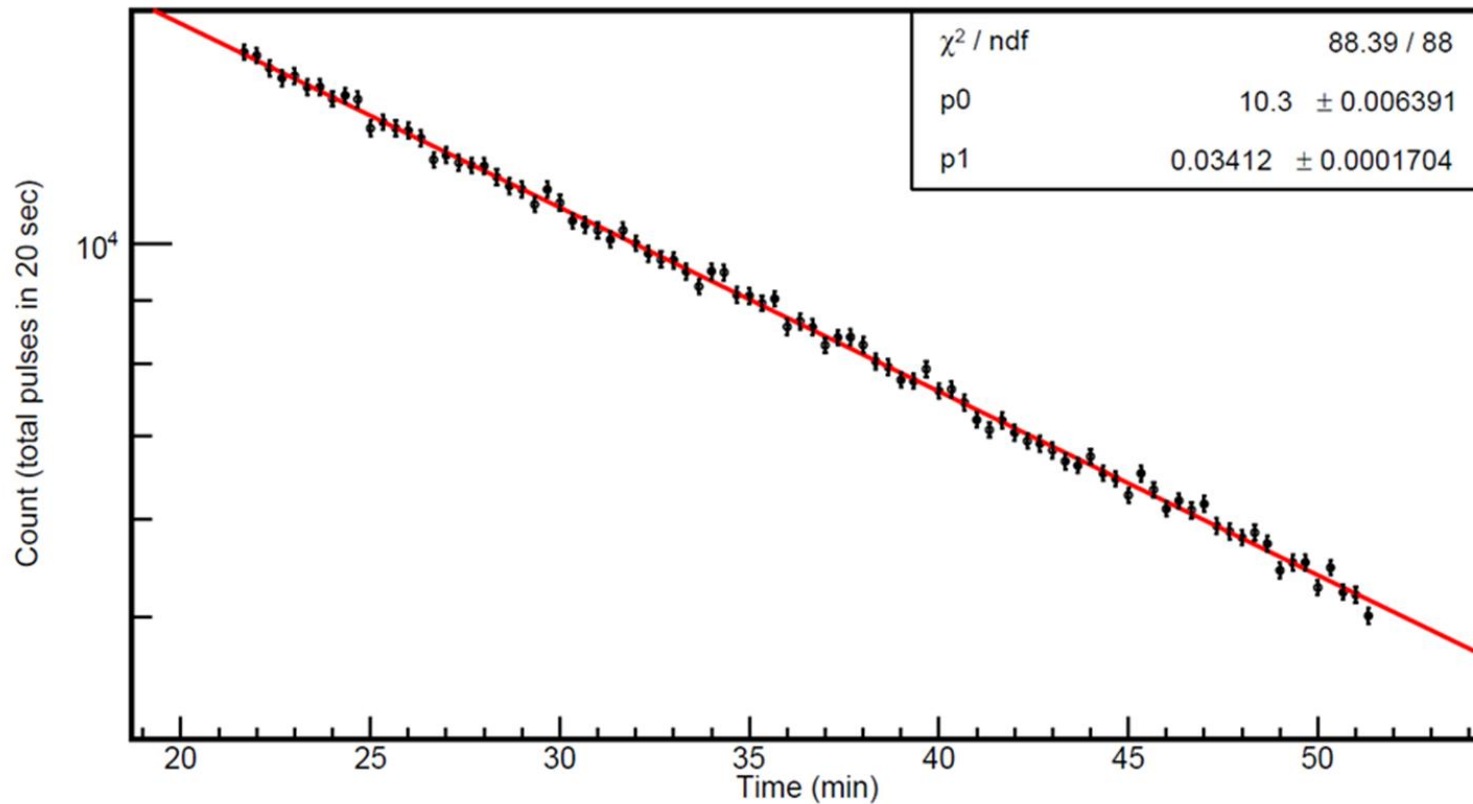
2 – мембрана из нержавеющей стали толщиной 200 мкм;

3 – бесконтактный датчик интенсивности выведенного пучка (токовый трансформатор);

4 – графитовая мишень, закрепленная на экранирующем блоке Neutrostop (Koros Kolin, Чехия) формы типа С стандартных размеров из полиэтилена;

5 – свинцовый поглотитель.





Кривая радиоактивного распада ^{11}C аппроксимировалась экспоненциальной функцией:

$$C = e^{(p0-p1t)}; \quad (4)$$

где параметр p1 — постоянная распада ^{11}C .

Активность изотопа в секунду на момент конца облучения будет равна:

$$C_0 = e^{p0/20}; \quad (5)$$



$$\sigma = \frac{C_0 \cdot \tau}{N_{\text{я}} \cdot d \cdot I \cdot \varepsilon};$$

График зависимости скорости счета от времени выдержки после окончания облучения активационного детектора ионами углерода. Красная линия — аппроксимирующая кривая. Длительность интервала измерения - 20 с, полный набор - 90 временных интервалов (30 мин).



С учетом применения поправочного коэффициента (0,99493 для 450 МэВ/нуклон и 0,99490 для 402,5 МэВ/нуклон) сечение реакции $^{12}\text{C}(^{12}\text{C},\text{X})^{11}\text{C}$ для энергии 450 ± 3 МэВ/нуклон составляет $\sigma_{450} = 65,249\pm 3,3$ мб ($1 \text{ б} = 10^{-24} \text{ см}^2$), а для энергии $402,5\pm 3$ МэВ/нуклон - $\sigma_{400} = 63,853\pm 3,2$ мб.

Энергия пучка ^{12}C , МэВ/нуклон	Сечение реакции, мб	Источник
400	$63,5 \pm 0,5$	Smith, A. R. Cross sections for the production of ^{11}C in C targets by ^{12}C at relativistic energies / A. R. Smith et al. // Physical Review C. – 1983. – Vol. 28. – P. 1614-1617.
400	$68,6 \pm 2,5$	Yashima, H. Cross sections for the production of residual nuclides by high-energy heavy ions / H. Yashima et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. – 2004. – Vol. 226. – P. 243-263.
402,5	$63,9 \pm 3,2$	Данные из этой работы
417,5	$72,3 \pm 14,5$	Horst, F. Measurement of PET isotope production cross sections for protons and carbon ions on carbon and oxygen targets for applications in particle therapy range verification / F. Horst // Physics in Medicine and Biology. – 2019. – Vol. 64. – P. 205012-205028.
450	$65,3 \pm 3,3$	Данные из этой работы

Спасибо за внимание!

