

Нуклеосинтез в звездах

Научный руководитель: А. Л. Барабанов (проф., д.ф.-м.н., доц.)

Студент: А. А. Несынов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Москва, 2025

Работа состоит из трех основных этапов:

- 1 Перевод научной статьи E. M. Holmbeck et al. «Nucleosynthesis and observation of the heaviest elements» (2023).
- 2 Проблемы машинного перевода
- 3 Моделирование кинематики рассеяния протонов на ядрах ^{12}C и верификация по данным Kiener (2019).

- **Тема:** Происхождение элементов тяжелее железа (актиноидов и сверхтяжелых элементов).
- **Основной механизм:** r -процесс (быстрый захват нейтронов).
- **Ключевые параметры:** Массы ядер, энергии связи и барьеры деления для нейтроноизбыточных ядер.

Механизм r-процесса

- **Захват нейтронов:** происходит быстрее, чем β -распад.
- **Путь синтеза:** пролегает через область крайне неустойчивых ядер.
- **Точка остановки:** баланс между захватом нейтронов и распадом определяет «путь» r-процесса.
- **Завершение:** ядра возвращаются к линии стабильности после истощения потока нейтронов.

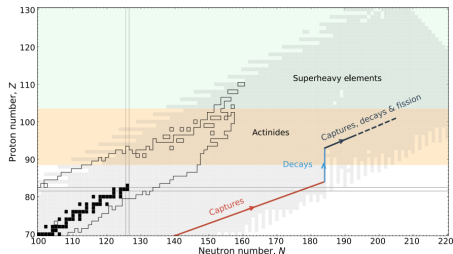


Схема r-процесса на карте нуклидов.

- **Где происходит:** Основной кандидат — слияния нейтронных звезд и черных дыр.
- **Наблюдательные признаки:**
 - Спектральный анализ кривых блеска (поиск тяжелых элементов).
 - Изучение состава древних «металлически бедных» звезд.
- **Вывод статьи:** Наблюдение актиноидов напрямую подтверждает синтез самых тяжелых элементов во Вселенной.

Основные выявленные трудности:

- **Просачивание оригинала:** Сохранение английских терминов (например, «abundance» вместо «распространенность»).
- **Контекстная слепота:** Непоследовательный перевод терминов в разных частях текста.

Вывод: Необходим гибридный подход — автоматизация первичной обработки с обязательной ручной корректировкой.

Задача о рассеянии протонов на ^{12}C

Процесс: $p + ^{12}\text{C} \rightarrow p' + ^{12}\text{C}^* \rightarrow p' + ^{12}\text{C} + \gamma$

- Исследуется спектральная линия $E^* = 4.439$ МэВ.
- **Цель:** Определение зависимости энергии E_γ от угла наблюдения α и энергии протонов E_p .
- **Значимость:** Диагностика движения горячей плазмы в астрофизических объектах.

Получена следующая зависимость энергии фотона от параметров задачи:

Итоговая формула

$$E_{\gamma} = E^{*} \cdot (1 + \beta_{cm} \cos \alpha + \beta_1 \cos \theta_{rel})$$

Для этого была применена формула Доплера в нерелятивистском приближении:

$$E_{\gamma} = E^{*} \cdot \frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \beta \cos \theta_{obs}} \approx E^{*} \cdot (1 + \beta \cos \theta_{obs})$$

Где скорость складывается из двух компонент:

- 1 Движение СЦИ вдоль оси пучка ($\beta_{cm} = \frac{V_{cm}}{c} = \frac{1}{c} \cdot \frac{\sqrt{2mE_p}}{m+M}$ под углом α к детектору).
- 2 Движение самого ядра в СЦИ ($\beta_1 = \frac{1}{c} \cdot \sqrt{\frac{2m}{M^{*}(m+M^{*})} \left(E_p \frac{M}{m+M} - E^{*} \right)}$ под случайным углом θ_{rel}).

Теоретическая модель: Границы профиля линии

Так как направление вылета ядра в СЦИ θ_{rel} случайно, значение $\cos \theta_{rel}$ распределено в интервале $[-1, 1]$. Это формирует прямоугольный профиль с границами:

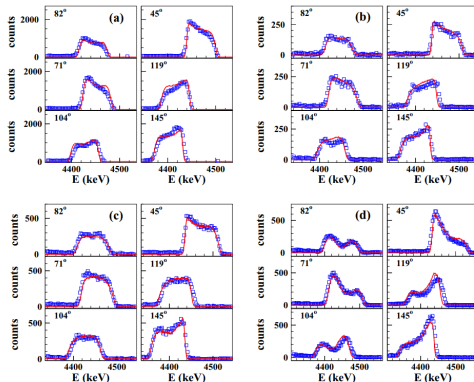
Кинематические границы

$$E_{\gamma}^{min,max} = E^* \cdot (1 + \beta_{cm} \cos \alpha \mp \beta_1)$$

Результат: Модель предсказывает ширину линии $\Delta E = 2E^* \cdot \beta_1$, которая зависит только от энергии протона, и общее смещение, зависящее от угла наблюдения α .

Сравнение с экспериментом: Kiener (2019)

- На графиках видна характерная «ящикообразная» форма линии.
- **Смещение:** при изменении угла α весь профиль сдвигается в область низких/высоких энергий.
- **Уширение:** при росте E_p ширина «плато» увеличивается.
- Края размыты из-за разрешения детектора (≈ 2 кэВ).



Спектры γ -линий при разных $E_p = 8,6$ МэВ (a), 10,0 МэВ (b), 11,4 МэВ (c) и 16,25 МэВ (d). и α [Kiener, 2019].

E_p (МэВ)	$\alpha, ^\circ$	Теория (кэВ)	ΔE (кэВ)	Статья (кэВ)	Откл.
8.6	45	4441 – 4503	62	4440 – 4505	± 2
10.0	45	4439 – 4511	72	4440 – 4510	± 1
11.4	145	4355 – 4436	81	4355 – 4440	± 4
16.25	145	4333 – 4440	107	4335 – 4440	± 2

- Максимальное отклонение расчетов от экспериментальных данных Kiener (2019) не превышает 0.1%.

- 1 Выполнен перевод современной работы по нуклеосинтезу сверхтяжелых элементов.
- 2 Обоснована необходимость ручной проверки машинного перевода для сохранения точности терминологии.
- 3 Выведена аналитическая модель кинематики реакции $^{12}\text{C}(p, p'\gamma)$, подтвержденная экспериментом с точностью до 1–4 кэВ.
- 4 Модель применима для анализа спектров солнечных вспышек.

Вак up: Верификация расчетов (8.6 и 10.0 МэВ)

E_p , МэВ	$\alpha, ^\circ$	$\cos \alpha$	Теория (кэВ)	ΔE , кэВ	Статья (кэВ)	Откл.
8.6	45	0.707	4441 – 4503	62	4440 – 4505	± 2
	71	0.326	4423 – 4485		4425 – 4485	± 2
	82	0.139	4415 – 4477		4415 – 4480	± 3
	104	-0.242	4397 – 4459		4395 – 4460	± 2
	119	-0.485	4386 – 4448		4385 – 4450	± 2
	145	-0.819	4370 – 4432		4370 – 4435	± 3
10.0	45	0.707	4439 – 4511	72	4440 – 4510	± 1
	71	0.326	4420 – 4492		4420 – 4495	± 3
	82	0.139	4410 – 4482		4410 – 4480	± 2
	104	-0.242	4391 – 4463		4390 – 4465	± 2
	119	-0.485	4379 – 4451		4380 – 4450	± 1
	145	-0.819	4362 – 4434		4360 – 4435	± 2

Вак up: Верификация расчетов (11.4 и 16.25 МэВ)

E_p , МэВ	α , °	$\cos \alpha$	Теория (кэВ)	ΔE , кэВ	Статья (кэВ)	Откл.
11.4	45	0.707	4437 – 4518	81	4435 – 4520	± 3
	71	0.326	4417 – 4498		4415 – 4500	± 2
	82	0.139	4407 – 4488		4405 – 4490	± 2
	104	-0.242	4386 – 4467		4385 – 4470	± 3
	119	-0.485	4373 – 4454		4375 – 4455	± 2
	145	-0.819	4355 – 4436		4355 – 4440	± 4
16.25	45	0.707	4431 – 4538	107	4430 – 4540	± 2
	71	0.326	4406 – 4513		4405 – 4515	± 2
	82	0.139	4395 – 4502		4395 – 4505	± 3
	104	-0.242	4370 – 4477		4370 – 4480	± 3
	119	-0.485	4355 – 4462		4355 – 4465	± 3
	145	-0.819	4333 – 4440		4335 – 4440	± 2