

**Вопрос:** Позволяет ли предлагаемая модернизация камеры ускорителя получить ответ о происхождении обойдённых ядер? Если да, то как и каких именно?

**Ответ:** Да, позволяет. С помощью измерений выходов фотоядерных реакций, выполненных при энергии 15 МэВ, их можно дополнить измерениями при энергии электронов 10 МэВ от линейного ускорителя электронов НИИЯФ МГУ. Можно сделать выводы о правильности измеренных сечений фотонейтронных реакций на пучках квазимонохроматических фотонов и делать оценки сечений, а также на основе сравнения с теоретическими расчетами делать выводы о применимости модельных параметров, использованных при расчетах сечений. Эти выводы можно делать для ядер, у которых активационным методом можно измерить выходы фотоядерных реакций, приводящих к их образованию и распаду. Например,  $^{92}\text{Mo}$ ,  $^{96}\text{Ru}$ ,  $^{102}\text{Pd}$ ,  $^{106}\text{Cd}$ ,  $^{112}\text{Sn}$  и др.

Данный вопрос мы рассматривали при моделировании возможных на модернизированном ускорителе экспериментов, он должен был войти в диплом. Далее приведу некоторые расчеты из диплома.

Обойденные ядра — это группа из 35 стабильных ядер с дефицитом нейтронов, начинаются с  $^{74}\text{Se}$ . Обойденные ядра характеризуются очень низкой распространенностью, их образование невозможно описать реакциями захвата нейтронов. Фотоядерные реакции считаются одним из механизмов образования обойденных ядер: последовательные фотонейтронные реакции (g, n), (g, 2n), (g, a). Считается, что обойденные ядра образуются при взрыве сверхновых, когда температура в звезде порядка  $10^9$  К. Рассмотрим р-процесс на примере  $^{92}\text{Mo}$  (рис.1). Реакции ведущие к образованию  $^{92}\text{Mo}$ :  $^{94}\text{Mo}(\gamma, 1n)^{93}\text{Mo}$ ,  $^{93}\text{Mo}(\gamma, 1n)^{92}\text{Mo}$ ,  $^{96}\text{Ru}(\gamma, \alpha)^{92}\text{Mo}$ . За разрушение  $^{92}\text{Mo}$  в процессе нуклеосинтеза ответственны фотоядерные реакции:  $^{92}\text{Mo}(\gamma, 1n)^{91}\text{Mo}$ ,  $^{92}\text{Mo}(\gamma, 1p)^{91}\text{Nb}$ ,  $^{92}\text{Mo}(\gamma, \alpha)^{88}\text{Zr}$ , а также реакции захвата нейтронов. Нужно иметь информацию о всех возможных реакциях.

В литературе подробно изучается р-процесс на равновесных фотонах при взрывах сверхновых, основная величина, необходимая для расчетов распространенности обойденных ядер в этих процессах — скорость реакции:

$$\lambda_{(\gamma, i)} = \int_0^{\infty} n_{\gamma}(E) \sigma_{(\gamma, i)}(E) dE, \quad (1)$$

где  $c$  — скорость света,  $E$  — энергия  $\gamma$ -квантов,  $n_{\gamma}(E)$  — распределение фотонов по энергии при данной температуре в звезде (Планковское распределение),  $\sigma_{(\gamma, i)}(E)$  — сечение фотоядерной реакции.

Для описания механизма образования обойденных ядер в результате нуклеосинтеза нужны либо сечения реакций либо скорости реакций. Исходя из спектра черного тела, ясно что нужна информация о сечениях в районе порогов реакций. Для  $(\gamma, 1n)$  порог находится в районе 8-10 МэВ.

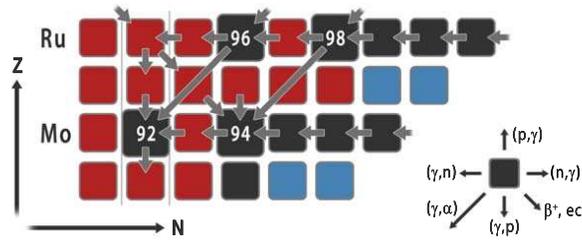


Рис. 1: Возможные пути образования обойденного ядра  $^{92}\text{Mo}$  в результате фото-ядерных реакций.

На тормозных пучках можно измерять непосредственно скорость реакции. В работе [1] показано, что спектр черного тела можно представить суммой тормозных спектров (рис.2), соответственно суммируя выходы реакций с разными весами, можно получить непосредственно скорость реакции. Для этого нужно менять энергию электронов более плавно, чем у нас. При наших возможностях этот метод недоступен.

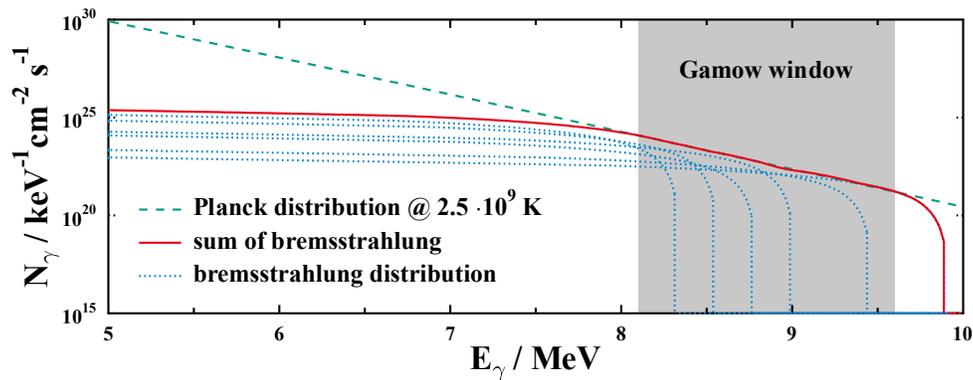


Рис. 2: Аппроксимация планковского распределения суммой тормозных спектров. рисунок взят из работы [1].

На пучках квазимонохроматических  $\gamma$ -квантов можно измерять сечение в районе

порога реакций и дальше рассчитывать скорость реакций. Однако существуют большие отличия между экспериментами. На рис.3. приведены сечения реакции  $^{94}\text{Mo}(\gamma, 1n)^{93}\text{Mo}$ , измеренные в разных лабораториях на установках NewSubaru [2], HIgS [3] и в Сакле [4]. Также приведены сечения, рассчитанные теоретически с помощью программы TALYS. На рис.4 приведены выходы реакции  $^{94}\text{Mo}(\gamma, 1n)^{93}\text{Mo}$ , рассчитанные на основе интерполированных сечений из [2–4] и теоретического сечения TALYS с использованием тормозных спектров с максимальной энергией 10 - 15 МэВ. Также эти результаты приведены в таблице 1. Единица измерения мб/е, дальше будет пересчитано в единицах сечения на экв. квант.

Активационный эксперимент позволяет измерить выходы фотоядерных реакций с погрешностью около 10 %, поэтому проводя измерения выходов при энергии 15 МэВ мы сможем сделать вывод о применимости того или иного сечения и сделать оценку.

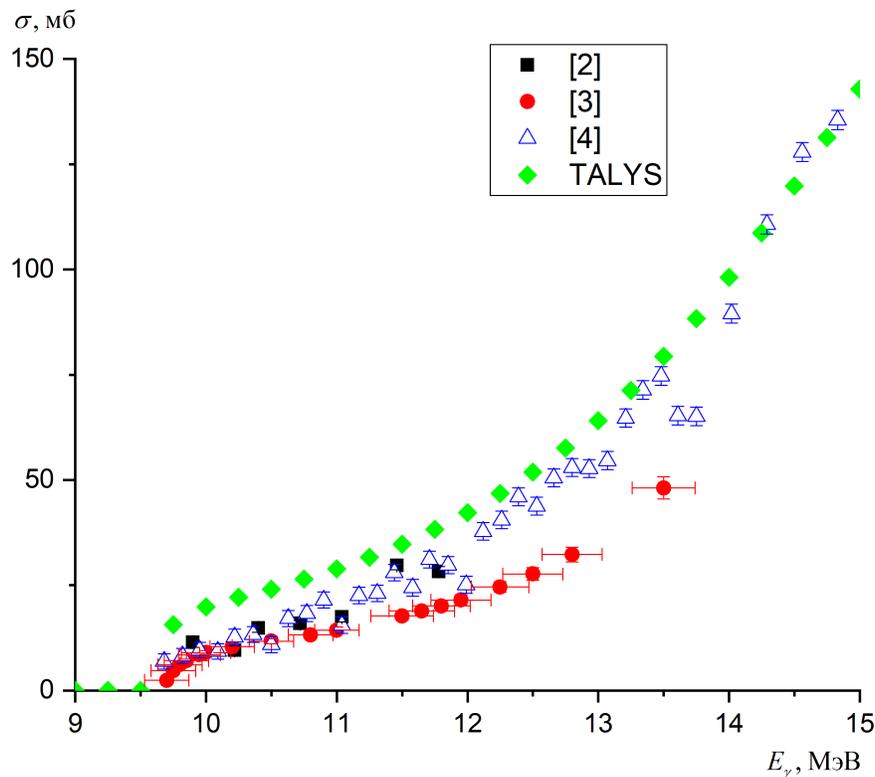


Рис. 3: Сечения фотоядерной реакции  $^{94}\text{Mo}(\gamma, 1n)^{93}\text{Mo}$  измеренные на пучках квазимонохроматических фотонов [2–4], теоретическое сечение, рассчитанное по программе TALYS.

Таблица 1: Выходы фотоядерной реакции  $^{94}\text{Mo}(\gamma, 1n)^{93}\text{Mo}$  рассчитанные на основе экспериментальных сечений [2–4] и теоретического сечения TALYS. Единица измерения мб/е

$E_e$ , МэВ	[2]	[3]	[4]	TALYS
10	0.00040	0.00026	0.00030	0.00218
11	0.0086	0.0067	0.0080	0.0201
12	0.032	0.024	0.031	0.060
13		0.058	0.080	0.133
14		0.116	0.167	0.250
15		0.213	0.313	0.433

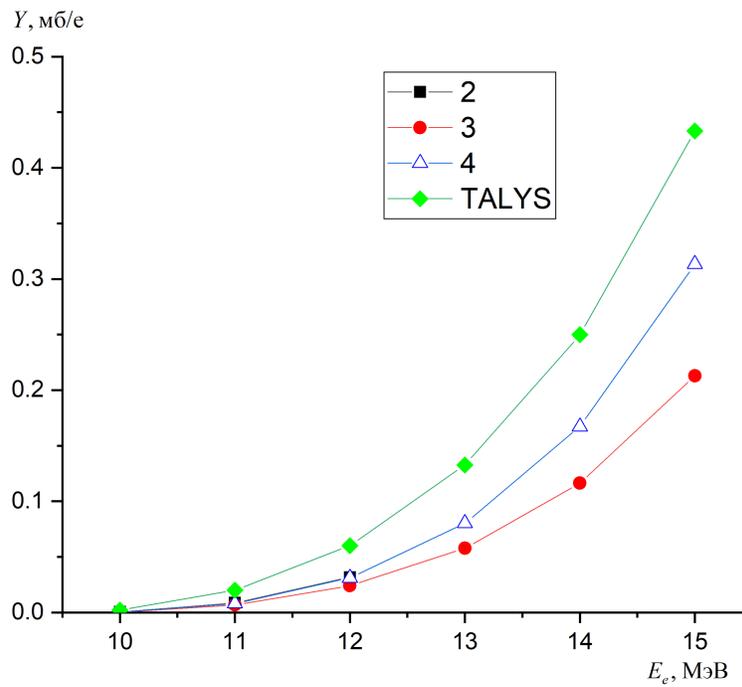


Рис. 4: Выходы фотоядерной реакции  $^{94}\text{Mo}(\gamma, 1n)^{93}\text{Mo}$  рассчитанные на основе экспериментальных сечений [2–4] и теоретического сечения TALYS.

В звездах при высокой температуре часть ядер находятся в возбужденных состояниях и нужно учитывать реакции на возбужденных состояниях ядер. Экспериментально измерить их нельзя. Мы можем делать выводы только о параметрах теоретических расчетов на основных состояниях ядер.

## Список литературы

- [1] *K Sonnabend, J Glorius et al.* Activation Experiments for p-Process Nucleosynthesis. Journal of Physics: Conference Series 312 (2011) 042007
- [2] *H.Utsunomiya, S.Goriely, T.Kondo et al.* Photoneutron cross sections for Mo isotopes: A step towards a unified understanding of ( $\gamma,n$ ) and ( $n,\gamma$ ) reactions. J,PR/C,88,015805,2013
- [3] *A.Banu, E.G.Meekins, J.A.Silano, H.J.Karwowski, S.Goriely* Photoneutron reaction cross section measurements on  $^{94}\text{Mo}$  and  $^{90}\text{Zr}$  relevant to the p-process nucleosynthesis. J,PR/C,99,025802,2019
- [4] *H.Beil,R.Bergere,P.Carlos,A.Lepretre,A.De Miniac, A.Veyssiere* A study of the photoneutron contribution to the giant dipole resonance in doubly even Mo isotopes. J,NP/A,227,427,1974