



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P15-85-497

Ю.П.Попов, Х.Риголь

ВОЗМОЖНАЯ РОЛЬ РЕАКЦИЙ $^{22}\text{Na}(n,p)^{22}\text{Ne}$
И $^{36}\text{Cl}(n,p)^{36}\text{S}$ В АСТРОФИЗИКЕ

Направлено в журнал "Письма в ЖЭТФ"

1985

Земные породы, метеориты и образцы лунного грунта, доставленные космическими аппаратами, тщательно исследуются с точки зрения их химического и изотопного состава. Примечательно, что отношения содержаний стабильных изотопов одного и того же элемента одинаковы в земном, лунном и метеоритном образцах. Эти факты говорят в пользу предположения о том, что Земля, Луна и метеориты имеют общее происхождение /1/.

Содержание элементов обычно выражается по отношению к их содержанию на Солнце; состав Солнца очень сходен с составом Земли и метеоритов, если учесть особые обстоятельства, например, потерю летучих газов. Такое содержание называют нормальным, или космическим /2/. Тем не менее встречаются случаи, когда изотопное распределение для определенного элемента может оказаться нарушенным. В частности, наблюдались аномальные распределения изотопов для кислорода, неона, магния, кремния, кальция, стронция, ксенона, бария, неодима и самария /3/.

Так, нормальное отношение распространенностей изотопов магния в природе $^{26}\text{Mg} / ^{24}\text{Mg} = 0,14$. Однако в некоторых типах метеоритов было обнаружено, что это отношение оказывается заметно большим /4/.

В связи с этим были высказаны гипотезы о том, что дополнительное количество ^{26}Mg может образоваться из ^{26}Al либо путём β^- -распада /5/, либо через реакцию $^{26}\text{Al} (n, p) ^{26}\text{Mg}$ /6/. Причём необходимое количество исходного радиоактивного изотопа ^{26}Al может образоваться при взрывном горении углерода. Но эти гипотезы были поставлены под сомнение в работе /7/, поскольку при горении углерода параллельно образованию ^{26}Al должно формироваться также большое количество радиоактивных ядер ^{36}Cl , которые затем путём β^- -распада должны переходить в ^{36}Ar . В связи с этим экспериментально искалась аномалия в содержании ^{36}Ar /8,9/, но результаты поисков не были положительными /10/.

Однако нам представляется, что отсутствие аномалии в содержании ^{36}Ar не закрывает гипотезы, высказанной в работах /5,6/. Дело в том, что ^{36}Cl помимо β^- -распада может "выгорать" при взрыве сверхновых (как и ^{26}Al) за счет реакции $^{36}\text{Cl} (n, p) ^{36}\text{S}$. Эта реакция была нами недавно обнаружена /11/, причём в интервале энергий нейтронов до 10 кэВ были наблюдаемы первые три резонанса. Используя эти данные, можно получить оценку значения сечения реакции $^{36}\text{Cl} (n, p) ^{36}\text{S}$ в области ниже 10 кэВ. Вклад реакции $^{36}\text{Cl} (n, \gamma) ^{37}\text{Cl}$, согласно нашим данным, будет, по крайней мере, на порядок меньше.

Чтобы сравнить роль бета-распада и реакции (n, p) в "выгора-

нии" ^{36}Ce , необходимо сравнить скорости этих процессов при взрыве сверхновых, т.е. определить соотношение величин:

$$\lambda_{36\text{Ce}} \cdot n_{36\text{Ce}} \quad \text{и} \quad n_{36\text{Ce}} \int \sigma_{np}(E_n) \phi(E_n) dE_n,$$

где $\lambda_{36\text{Ce}}$ - постоянная радиоактивного распада ядра ^{36}Ce , а ϕ - поток нейтронов ($\text{н}/\text{см}^2 \cdot \text{с}$) при взрыве сверхновой. В качестве нижней оценки вклада реакции (n, p) можно использовать интеграл в пределах энергий нейтронов от нуля до 10 кэВ, где сечение измерено [11]. Известно, что при взрыве сверхновых образуется очень мощный поток нейтронов порядка $10^{24} - 10^{30} \text{н}/\text{см}^2 \cdot \text{с}$ [12]. Если мы предположим, что распределение нейтронов по энергии подчиняется закону Максвелла при температуре взрыва 10^9К , то доля нейтронов с энергией ниже 10 кэВ будет $\sim 3 \cdot 10^{-2}$, т.е. поток таких нейтронов составит более $10^{22} \text{н}/\text{см}^2 \cdot \text{с}$, и

$$\lambda_{36\text{Ce}} = 7,7 \cdot 10^{-14} \ll \int_0^{10 \text{кэВ}} \sigma_{np}(E_n) \phi(E_n) dE_n \approx 4 \cdot 10^{-3} \text{с}^{-1}$$

Отсюда следует, что "выгорание" ^{36}Ce будет происходить преимущественно за счёт реакции $^{36}\text{Ce}(n, p)^{36}\text{S}$, а не бета-распада. В этом случае надо искать аномалию в распространённости изотопа ^{36}S , а не в распространённости ^{36}Ar , как это было сделано в работах [8, 9].

Наши расчёты справедливы, если поток нейтронов при взрыве сверхновых длился несколько десятков минут. Такое предположение не представляется нереальным, поскольку блеск сверхновых, согласно наблюдениям, спадает в несколько раз за 10 - 100 суток [13].

Есть ещё одна аномалия в распространённости изотопов, которую мы хотели бы обсудить. Нормальное соотношение изотопов неона $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} = 10$. Но в некоторых метеоритах наблюдалась [14-16] так называемая Ne -E-компонента, для которой $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} \approx 3,4$. С целью объяснения такой аномалии была предложена [17, 18] гипотеза, согласно которой при взрывном горении гелия в сверхновых звёздах формируется ^{22}Na , а затем ^{22}Ne преобразуется в ^{22}Ne благодаря β^+ -распаду. На основе нашей работы [19], где экспериментально обнаружен первый нейтронный резонанс в реакции $^{22}\text{Na}(n, p)^{22}\text{Ne}$, который определяет очень большое сечение этой реакции при энергии нейтронов до нескольких сот эВ, мы предполагаем, что эта реакция также может играть существенную роль в процессе преобразования ^{22}Na в ^{22}Ne .

Если взрыв сверхновой происходит при температуре $\sim 10^9 \text{К}$ и нейтроны подчиняются распределению Максвелла, то около $1,5 \cdot 10^{-4}$ всех нейтронов имеют энергию меньше 300 эВ. В этом случае

$$\lambda_{22\text{Na}} = 8,8 \cdot 10^{-9} \ll \int_0^{300 \text{эВ}} \sigma_{np}(E_n) \phi(E_n) dE_n \approx 2,3 \cdot 10^{-2} \text{с}^{-1}$$

Таким образом, при взрыве сверхновых ^{22}Na практически полностью "выгорает" за счёт реакции (n, p). Вклад бета-распада ^{22}Na в образование ^{22}Ne может быть существенным лишь на стадии предвзрывного горения гелия в сверхновых.

Представленные в настоящей работе выводы говорят о том, что в ряде случаев необходимо учитывать вклад реакции (n, p) на сравнительно лёгких радиоактивных ядрах в механизм образования отдельных изотопов в природе. В связи с этим представляется интересным расширение исследований и поиска реакции (n, p) на нейтронодефицитных радиоактивных изотопах, где протонный канал распада нейтронных резонансов является основным. Заметим, что "замена" бета-распада реакцией (n, p) может сказаться и на балансе потока нейтрино, поскольку второй процесс безнейтринный.

Литература

1. Тейлер Р. Дж. Происхождение химических элементов. Изд. Мир. М., 1975, с. 46.
2. Trimble V. Rev. Mod. Phys., 1975, 47, p. 877-978.
3. Lee T. Planetology. Rev. Geophys. Space Phys. 1979, 17, p. 1591.
4. Lee T., Papanastassiou D.A. Geophys. Res. Lett., 1974, V. 1, p. 225.
5. Arnett W.D., Wefel J.P., Astrophysical J., 1978, V. 224, L-139.
6. Trautvetter H.P., Kappeler F. Z. Phys. A., 1984, V. 318, p. 121.
7. Clayton D.D. Icarus, 1977, V. 32, p. 255.
8. Clayton D.D. Earth Planet. Sci. Lett., 1977, V. 36, p. 381.
9. Hudson B. Meteoritic, 1977, V. 12, p. 258.
10. Podosek F.A. Ann. Rev. Inc., 1978, V. 16, p. 319.
11. Гledenov Ю. М. и др. В кн.: "Тезисы докладов XXXIV Сессии по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра" Л.: Наука, 1984, с. 56.
12. Соболевин Э. В. В кн.: Изотопная космохимия. М. Атомиздат, 1974, с. 18.
13. Шкловский И. С. В кн.: Звёзды: их рождение, жизнь и смерть. М.: Наука, 1984, с. 207.
14. Black D.C. Geochim. Cosmochim. Acta, 1972, V. 36, p. 347.
15. Herzog G., Anders E. Earth Planet. Sci. Lett., 1974, V. 24, p. 173.
16. Eberhardt P. Earth Planet. Sci. Lett., 1974, V. 24, p. 182.
17. Clayton D.D. Astrophysics J., 1975, V. 198, p. 151.
18. Clayton D.D. Nature, 1975, v. 257, p. 36.
19. Gledenov Yu. M. a.o. Z. Phys. A 308, 1982, p. 57.

Рукопись поступила в издательский отдел

1 июля 1985 года

Принимается подписка на препринты и сообщения Объединенного института ядерных исследований.

Установлена следующая стоимость подписки на 12 месяцев на издания ОИЯИ, включая пересылку, по отдельным тематическим категориям:

ИНДЕКС	ТЕМАТИКА	Цена подписки на год
1.	Экспериментальная физика высоких энергий	10 р. 80 коп.
2.	Теоретическая физика высоких энергий	17 р. 80 коп.
3.	Экспериментальная нейтронная физика	4 р. 80 коп.
4.	Теоретическая физика низких энергий	8 р. 80 коп.
5.	Математика	4 р. 80 коп.
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия	4 р. 80 коп.
7.	Физика тяжелых ионов	2 р. 85 коп.
8.	Криогеника	2 р. 85 коп.
9.	Ускорители	7 р. 80 коп.
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных	7 р. 80 коп.
11.	Вычислительная математика и техника	6 р. 80 коп.
12.	Химия	1 р. 70 коп.
13.	Техника физического эксперимента	8 р. 80 коп.
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами	1 р. 70 коп.
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях	1 р. 50 коп.
16.	Дозиметрия и физика защиты	1 р. 90 коп.
17.	Теория конденсированного состояния	6 р. 80 коп.
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники	2 р. 35 коп.
19.	Биофизика	1 р. 20 коп.

Подписка может быть оформлена с любого месяца текущего года.

По всем вопросам оформления подписки следует обращаться в издательский отдел ОИЯИ по адресу: 101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79.

Попов Ю.П., Риголь Х. P15-85-497
Возможная роль реакций $^{22}\text{Na}(n,p)^{22}\text{Ne}$ и $^{36}\text{Cl}(n,p)^{36}\text{S}$ в астрофизике

В работе обсуждается возможная роль реакции (n, p) в процессе преобразования радиоактивных ядер ^{36}Cl и ^{22}Na во время взрыва сверхновых звезд, которые являются источниками формирования метеоритов. Показывается, что, если интегральный поток нейтронов, испускаемый во время взрыва $10^{24} \pm 10^{30} \text{ н/см}^2 \cdot \text{с}$, и если скорости нейтронов подчиняются распределению Максвелла, тогда практически все реактивные ядра ^{22}Na и ^{36}Cl выгорают во время взрыва сверхновых. И в этом случае ядра ^{36}Cl преобразуются в ^{36}S путем реакции (n, p) , а не в ^{36}Ar через β^- -распад. Этим объясняется отрицательный результат поисков аномалии в распространенности ^{36}Ar в метеоритах.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод авторов

Popov Yu.P., Rigol J. P15-85-497
The $^{22}\text{Na}(n,p)^{22}\text{Ne}$ $^{36}\text{Cl}(n,p)^{36}\text{S}$ Reactions Possible Role in Astrophysics

In this paper we discuss the possible role of the (n, p) reaction in the process of transformation of the radioactive isotopes ^{22}Na and ^{36}Cl during the explosion of supernovae stars, which are the sources of meteorites. Under assumption that the total neutron flux is of the order of $10^{24} - 10^{30} \text{ n/s} \cdot \text{cm}^2$ and that the neutron velocity distribution function is the Maxwellian one, we have demonstrated that nearly all the radioactive isotopes ^{22}Na and ^{36}Cl are consumed during the supernovae explosion and the isotopes ^{36}Cl are there transformed through the (n, p) reaction into ^{36}S and not into ^{36}Ar through β^- -decay as it was assumed before. That is why no anomaly in the distribution of ^{36}Ar in meteorites was found.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985