

3.4 «Экзотические» ядра

Фундаментальная проблема ядерной физики - получение и изучение свойств ядер, находящихся в экстремальном состоянии - экзотических ядер. Это ядра, имеющие большой угловой момент («бешено» вращающиеся ядра), высокую энергию возбуждения («горячие» ядра), сильнодеформированные ядра (супер- и гипердеформация, ядра с необычной конфигурацией), ядра с аномально высоким числом нейтронов или протонов (нейтроноизбыточные и протоноизбыточные ядра), сверхтяжёлые ядра с числом протонов $Z > 110$. Изучение свойств ядерной материи в экстремальных состояниях дает информацию о свойствах микромира и позволяет моделировать различные процессы, происходящие во Вселенной.

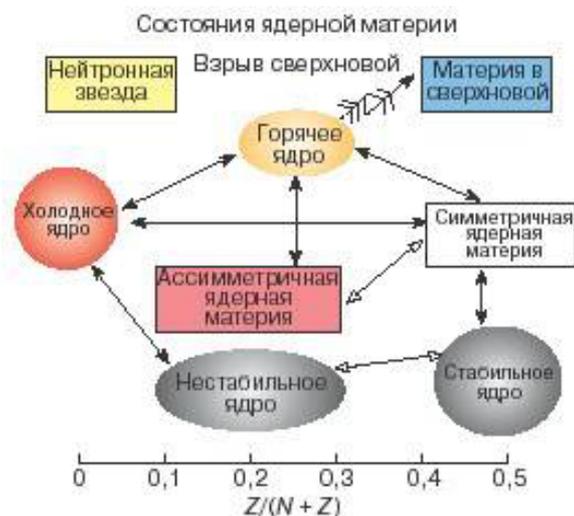


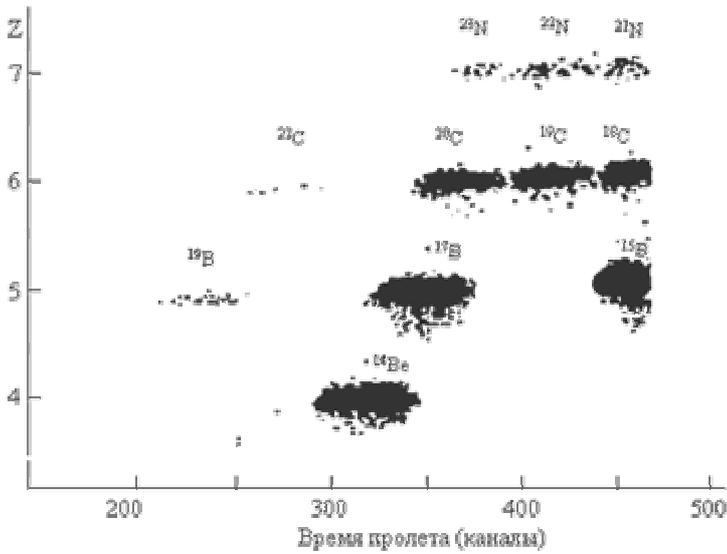
Рис. 10. Схематическое представление состояний ядерной материи в зависимости от соотношения числа протонов (Z) к общему числу нуклонов ($N + Z$) в ядре.

Таким образом, синтезируя и изучая экзотические состояния ядер, мы продвигаемся в понимании не только фундаментальных свойств самого ядра, но и окружающей нас Вселенной.

На **Рис. 10** схематично показаны состояния ядерной материи. Первое состояние - симметричная ядерная материя (1). Оно определяется свойствами стабильных ядер - их энергией (E), плотностью распределения нейтронов (N) и протонов (Z), массой (m) и др. Второе состояние - это чисто нейтронная материя, аналогом которой могут быть нейтронные звезды. Оно достигается увеличением нейтронного избытка в ядрах, которые искусственно синтезируются в лабораторных условиях на мощных ускорителях. И, наконец, материя, соответствующая состоянию вещества в сверхновых космических образованиях, характеризующаяся чрезвычайно высокой плотностью ($\sim 10^{12}$ г/см³) и температурой ($\sim 10^9$ градуса). Это состояние материи также моделируется искусственно в ядерных реакциях с ускоренными до высоких энергий ядрами (несколько гига-электронвольт на нуклон).

Для синтеза экзотических ядер используются ускорители тяжелых ионов с энергиями от десятков мегаэлектронвольт до сотен гигаэлектронвольт. Для того чтобы началась ядерная реакция, энергия ускоренного ядра должна превышать кулоновскую энергию отталкивания двух положительно заряженных ядер, которая обычно составляет несколько десятков МэВ. При энергиях выше кулоновского барьера возможны различные каналы реакции, вероятность которых зависит от энергии ядра-снаряда, от свойств самих взаимодействующих ядер, а также от расстояния, на котором сталкиваются два ядра. При лобовых столкновениях с энергиями ниже порога фрагментации двух ядер (~ 30 МэВ/нуклон), когда происходит полный развал, фрагментация ядер частицы и мишени, в основном протекают реакции полного слияния ядер мишени и бомбардирующего иона с образованием нового составного ядра, имеющего заряд и массу, близкую к сумме зарядов и масс двух взаимодействующих ядер. Это новое составное ядро имеет очень высокую температуру, так как вся кинетическая энергия бомбардирующей частицы переходит во внутреннюю энергию возбуждения нового ядра, и большой угловой момент, то есть большую скорость вращения. В таком состоянии это экзотическое ядро существует всего лишь 10^{-16} секунды и затем переходит в менее экзотическое состояние, «остывая» и уменьшая скорость вращения. Релаксация может происходить по-разному. Тепловая энергия кипящего ядра сбрасывается в основном из-за испарения нейтронов и заряженных частиц, а энергия вращения благодаря испусканию гамма-квантов. После этого ядро переходит в основное состояние, уменьшая массу на число испарившихся нейтронов, которое может достигать значительной величины (до 18-22 нейтронов).

Рис. 11. Времяпролетный спектр масс ядер



нуклонов, можно также делать выводы о свойствах ядерной материи в этом экзотическом ядре, имеющем высокую температуру.

Кроме реакций слияния, при большом радиусе взаимодействия двух ядер могут протекать и другие процессы, например реакции передачи нуклонов, развалы бомбардирующего ядра с захватом его части ядром мишени. С увеличением энергии бомбардирующего ядра при ее определенном пороговом значении (~ 30 МэВ/нуклон) ядра начинают фрагментироваться, то есть раскалываться на множество более легких ядер в широком диапазоне масс, зарядов и температур.

Оказалось, что в реакциях фрагментации ядер в больших количествах могут образовываться как сильно **нейтроноизбыточные**, так и сильно **нейтронодефицитные** ядра. Избыток и дефицит нейтронов в конечных ядрах зависит от соотношения нейтронов и протонов в бомбардирующем ядре. Например, если использовать пучок изотопа кальция-48 (самый нейтронообогащенный изотоп (20 протонов и 28 нейтронов), встречающийся в природе), то удаётся синтезировать более тридцати новых нейтроноизбыточных ядер, расположенных у самой границы ядерной стабильности – ^{18}B , ^{22}C , ^{23}N , ^{24}O , ^{29}F и др. Граница нейтронной стабильности $N_p=0$ в настоящее время относительно хорошо известна лишь для самых легких ядер. На **Рис. 11** показан полученный методом времени пролета спектр масс ядер с $Z=4-7$.

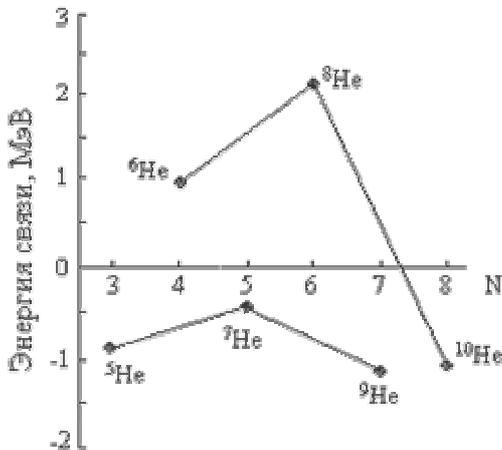


Рис. 12. Энергия связи одного и двух нейтронов в изотопах He («гелиевая аномалия»)

Граница нейтронной стабильности достигнута для изотопов с $Z=4$ с обнаружением ^{11}Be . На пучке ^{56}Fe был синтезирован самый тяжелый связанный изотоп с $Z=5$ – ^{19}B . В совместных экспериментах на пучках ^{40}Ar и ^{48}Ca с энергией ~ 50 МэВ/нуклон были обнаружены связанные нейтроноизбыточные ядра ^{22}C , ^{23}N , ^{29}F , $^{29,30,32}\text{Ne}$.

Особый интерес представляют легкие нейтроноизбыточные ядра, т.к. для них получено наибольшее отношение N/Z : для ^9He $N/Z=3.5$, для ^{34}Na – 2.1, а для ^{252}Cf – 1.6. Исследования легких нейтроноизбыточных ядер позволяют получить информацию о свойствах нейтронного вещества и малонуклонных экзотических систем.

Интригующая ситуация существует со свойствами сверхтяжелых изотопов водорода и гелия. Сначала была обнаружена так называемая «гелиевая аномалия», когда стабильность ядер с увеличением числа нейтронов при приближении к линии стабильности не уменьшалась, а даже увеличивалась. Изотоп ^8He оказался более связанной системой по отношению к эмиссии одного и двух нейтронов, чем ^6He , т.е. ядро ^8He оказалось более стабильным, чем ядро ^6He . Такую же зависимость обнаружили и для несвязанных

изотопов гелия: ^5He , ^7He , ^9He , ^{10}He (например, энергия отделения нейтрона у ^7He больше, чем у ^5He , **Рис. 12**). В системе ^{10}He (два протона и восемь нейтронов) был обнаружен резонанс, который свидетельствовал, что это ядро не связано всего лишь на 1 МэВ. Впоследствии такая же аномалия наблюдалась и для тяжелых несвязанных изотопов водорода (^6H оказался более стабильным, чем ^4H), проявляющихся также в виде резонансных состояний. Эти закономерности в поведении энергии связи тяжелых изотопов позволили более оптимистически взглянуть на проблему существования острова стабильных легких элементов.

Замечание. В 2003 появились публикации о синтезе сверхтяжелого изотопа водорода ^7H в реакции $^8\text{He}(p,^2\text{He})$. В отличие от сложившихся представлений, два нейтрона из четырех, входящих в состав нейтронного гало ^8He , образуют с альфа-частичным остовом ядро ^6He в возбужденном состоянии.

Существенную роль в области легких нейтроноизбыточных ядер играют силы n-n спаривания. Как правило все легкие ядра, по которым проходит граница нейтронной стабильности (за исключением $Z=1$) имеют четное число нейтронов. Так например, изотоп ^{14}Be имеет связанное состояние, в то время как ^{13}Be не имеет. Аналогичная ситуация с ^{22}C и ^{21}C . Нестабильными по отношению к испусканию нейтронов являются изотопы ^{16}B и ^{18}B , в то время как ^{17}B и ^{19}B стабильны.

Исследование свойств ядер, сильнообогащенных нейтронами, позволило обнаружить еще одно интересное явление - существование так называемых «нейтронных гало». Это явление появляется у ядер, находящихся у границы стабильности, таких, как ^8He , ^{11}Li , ^{14}Be , ^{17}B . В этих ядрах было экспериментально обнаружено высокое значение нуклонного радиуса. Оказалось, что у ^{11}Li два слабосвязанных нейтрона находятся на большом удалении от основного остова, представляющего из себя ядро ^9Li . Радиусы этих ядер в несколько раз превышают радиусы соседних ядер. Радиусы ядер обычно выражают в фемтометрах (Фм) (1 Фм равен 10^{-13} см). Так вот, у ядра ^{11}Li радиус оказался равным 12 Фм, тогда как для ^9Li он равен 2.5 Фм. Необычная структура этих ядер проявляется в увеличении вероятности протекания ядерных реакций с такими ядрами, поскольку она пропорциональна радиусу взаимодействующих ядер.

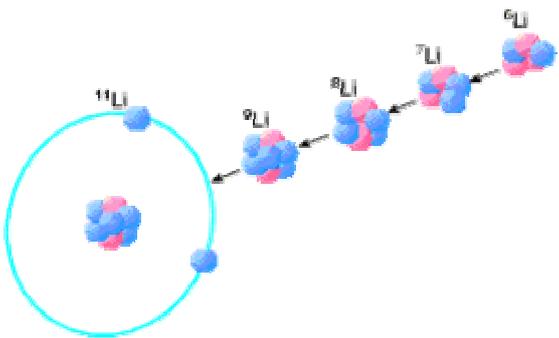


Рис. 13. Схематическое изображение эволюции ядра лития по мере увеличения числа нейтронов

Снова обратимся к легким нейтроноизбыточным ядрам. В стабильных ядрах все нейтроны сильно связаны с ядром, но посмотрим, что происходит по мере увеличения числа нейтронов. На **Рис. 13** показана в качестве примера эволюция ядра лития. Вначале прибавления нейтронов к стабильному ^6Li вплоть до ^9Li нейтроны "компактно" укладываются к имеющимся нуклонам. Но на ^9Li заканчивается формирование оболочки, и в ^{11}Li два нейтрона оказываются намного дальше компактного кора ^9Li , образуя диффузное облако или гало почти чисто нейтронного вещества. Поэтому изучение свойств таких ядер (^8He , ^{14}Be) во вторичных реакциях (взаимодействие такого ядра с обычными ядрами) может существенно расширить наши знания о ядерной материи.

Если обратиться к другому склону долины стабильности, к протоноизбыточным ядрам, то здесь исследователей ждут эффекты, связанные с ролью кулоновской энергии в формировании ядерной материи. Для этих ядер ожидаются новые типы распада, такие, как задержанная эмиссия бета-частиц, протонная радиоактивность и эмиссия кластеров. Мы рассмотрим их в следующей лекции.

В настоящее время исследуется проблема – как проявляются обнаруженные для ядер долины стабильности магические числа в экзотических ядрах. В области ядер $N = 20$ неожиданной оказалась нестабильность дважды магического ядра ^{28}O ($Z = 8$, $N = 20$). Исследование распадных характеристик ядер вблизи ^{44}S дали первую информацию о существовании деформированных ядер с $N = 28$. Были получены ядра ^{45}Fe , ^{49}Ni с экстремальным отношением N/Z . Получено самое тяжелое дважды магическое самоспряженное ядро ^{100}Sn ($Z = N = 50$).

Эти новые неожиданные явления, обнаруженные для экзотических ядер, приводят к новому взгляду на атомные ядра, и позволяют глубже понять ядерную динамику. Это делает экзотические ядра предметом приоритетных исследований.