

## SUPERDENSE NUCLEI STATE

S. D. BOGDANOV

*Does another world of the superdense nuclei state exist in nature? Theoretical conceptions, the synthesis of the superdense nuclei on the accelerators and the perspectives of its employment are presented.*

**Существует ли отдельный мир сверхплотной ядерной материи? Описываются теоретические представления, синтез сверхплотных ядер на ускорителях и перспективы их использования.**

## СВЕРХПЛОТНАЯ ЯДЕРНАЯ МАТЕРИЯ

С. Д. БОГДАНОВ

Санкт-Петербургский государственный  
технический университет

### ВВЕДЕНИЕ

Ядерная физика — наука о строении и свойствах атомных ядер, их взаимодействиях и превращениях — одна из наиболее фундаментальных областей человеческого знания, имеющая большое практическое применение. Картина ядерной физики, история которой началась с открытия радиоактивности А. Беккерелем в 1896 году, за последнее время существенно изменилась и сильно отличается от излагаемой в традиционных курсах физики. Акценты сместились в сторону ядерной физики высоких энергий, ядро-ядерных взаимодействий, поиска новых форм ядерной материи типа сверхплотной ядерной материи. Разнообразнее стали прикладные задачи ядерной физики: теперь это не только энергетика, но и медицинская ядерная физика, создание новых материалов, материаловедение.

Ниже приведены основные сведения о физике сверхплотной ядерной материи, а также кратко рассказано о наиболее интересных и перспективных направлениях исследований.

### ШКАЛА РАССТОЯНИЙ И ЭНЕРГИЙ. СОСТАВЛЯЮЩИЕ АТОМНОГО ЯДРА

Если в атомной физике характерным расстоянием является ангстрем ( $\text{\AA}$ ):  $1 \text{\AA} = 10^{-10}$  м, то в физике ядра это расстояние порядка фемтометра (фм),  $1 \text{ фм} = 10^{-15}$  м, то есть на пять порядков меньше. Переход к физике элементарных частиц соответствует переходу к расстояниям в доли фемтометра. Характерная энергия в атомной физике — величина порядка электронвольта ( $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж), в ядерной физике энергию удобно измерять в килоэлектронвольтах и мегаэлектронвольтах ( $1 \text{ кэВ} = 10^3 \text{ эВ}$ ,  $1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ}$ ), в физике элементарных частиц — в сотнях мегаэлектронвольт и гигаэлектронвольтах ( $1 \text{ ГэВ} = 10^9 \text{ эВ}$ ). Таким образом, видно, что исследование структуры материи на все меньших расстояниях требует все больших энергий. Массе покоя частицы отвечает энергия  $E = mc^2$ . Мы говорим, что массы нуклонов (нейтрона и протона) равны 940 МэВ, если  $E = mc^2 = 940 \text{ МэВ}$ . В шкале масс  $1 \text{ МэВ} = 1,78 \times 10^{-30}$  кг.

Основные составляющие атомного ядра — это нуклоны: протоны и нейтроны, связанные между собой сильным взаимодействием (ядерными силами).

Оно осуществляется путем обмена мезонами, причем особое значение имеет обмен самыми легкими из сильно взаимодействующих мезонов — пионами ( $\pi^+$ ,  $\pi^0$ ,  $\pi^-$ ) с массой около 140 МэВ. Кроме того, согласно современным представлениям, на небольшое время (порядка  $10^{-23}$  с) в ядре могут появляться (виртуально рождаться) возбужденные состояния нуклонов —  $\Delta$ -изобары с массой 1232 МэВ,  $\rho$ - и  $\omega$ -мезоны с массой 769 и 783 МэВ и другие частицы. Поэтому частица, взаимодействующая с ядром, может чувствовать не только протоны и нейтроны, но и пионы, которыми обмениваются нуклоны, и другие виртуальные частицы.

### РАЗМЕРЫ ЯДЕР И НУКЛОН-НУКЛОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Размеры ядер зависят от числа содержащихся в них нуклонов. Средняя плотность нуклонов в ядре для всех многонуклонных ядер практически одинакова, то есть нуклоны в ядре находятся на одинаковом расстоянии друг от друга. Как следствие объем ядра пропорционален числу нуклонов  $A$ , а его линейный размер пропорционален  $A^{1/3}$ . Эффективный радиус ядра дается формулой  $R = 1,2A^{1/3}$  фм. Плотность ядерного вещества чрезвычайно велика по сравнению с плотностью обычных веществ и составляет около  $10^{14}$  г/см<sup>3</sup>. Тем не менее ядро является довольно разреженной системой по сравнению с плотностью вещества внутри протона. Средний размер протона равен всего лишь 0,8 фм, и как следствие отношение плотности ядерного вещества в ядрах к плотности вещества внутри протона составляет от 0,4 для наиболее легкого ядра типа  ${}^4\text{He}$  до 0,6 для тяжелых ядер типа  ${}^{208}\text{Pb}$ . Видно, что в ядре много свободного места, дающего возможность сближать нуклоны и уплотнять ядерное вещество.

Энергия связи ядра — это энергия, которую необходимо затратить, чтобы расщепить ядро на отдельные нуклоны. Она равна разности суммы масс входящих в ядро нуклонов и действительной массы ядра. Отметим также, что если мы соберем ядро из отдельных нуклонов, то при этом выделится энергия, равная энергии связи ядра. Используя это свойство ядерной материи добиваются выделения огромных энергий в реакциях термоядерного синтеза. Замечательной особенностью атомных ядер является тот экспериментальный факт, что энергия связи приблизительно пропорциональна числу нуклонов в ядре, так что удельная энергия связи (энергия связи, приходящаяся на один нуклон) слабо изменяется при изменении  $A$  (для большинства ядер она составляет 6–8 МэВ). Это свойство, называемое насыщением ядерных сил, означает, что каждый нуклон эффективно связывается не со всеми нуклонами ядра (в этом случае энергия связи была бы пропорциональна  $A^2$ ), а только с их конечным числом.

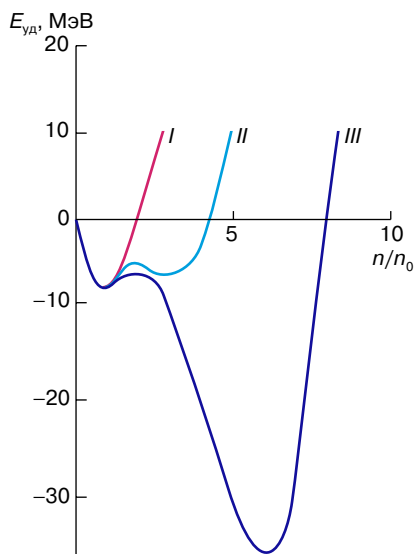
Эти свойства ядерной материи легко объясняются особенностями нуклон-нуклонного взаимодей-

ствия. Взаимодействие двух нуклонов между собой можно приближенно представить потенциалом — имеются притяжение на расстояниях более 1,5 фм и очень сильное отталкивание (отталкивательный кор) на расстояниях меньше одного фемтометра, характерных для физики элементарных частиц. Правда, потенциал этот необычный. На самом деле он зависит не только от расстояния между нуклонами, но от скоростей нуклонов, взаимной ориентации их спинов, взаимной ориентации спина и орбитального момента относительного движения нуклонов, и этим обусловлены многие интересные явления в ядерной физике. В настоящее время сконструированы потенциалы, хорошо описывающие как свойство связанного состояния нейтрона и протона — дейтрона, так и нуклон-нуклонное рассеяние до энергии в несколько сот мегаэлектронвольт. Отталкивательный кор, впрочем, приходится вводить искусственно. Его природа, по-видимому, должна объясняться в рамках физики элементарных частиц на основе представлений о нуклонах и мезонах как связанных состояниях кварков и антикварков.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Не может ли ядерная материя существовать в новых, неизвестных нам формах — быть с гораздо большей плотностью? Такой вопрос неоднократно обсуждался в последние годы. В 1971 году А.Б. Мигдал разработал теорию, в которой взаимодействие нуклонов сильно зависит от плотности ядерной материи. При критических плотностях ядерной материи оказываются возможными фазовые переходы, приводящие к созданию нового сверхплотного ядерного вещества — так называемые сверхплотные ядра или изомеры по плотности. Рассмотрим выводы этой теории подробнее. На рис. 1 приведены возможные зависимости удельной энергии связи, взятой со знаком минус, от плотности ядерной материи  $n/n_0$ . За единицу плотности ядерной материи принята “нормальная” ядерная плотность  $n_0$ . На данный момент экспериментаторы полностью уверены в двух точках на этой зависимости. Первая точка — при отсутствии ядерной материи ( $n/n_0 = 0$ ) — удельная энергия связи также равна нулю. Вторая точка — состояние обычного стабильного ядра ( $n/n_0 = 1$ ) — удельная энергия связи близка к 6–8 МэВ. Плавно соединяем кривой эти точки, учитывая, что в точке  $n/n_0 = 1$  существует минимум: как для небольшого уменьшения плотности ядерной материи, так и для небольшого увеличения ее плотности требуется внести в ядерное вещество дополнительную энергию. При  $n/n_0 > 1$  теоретически возможны несколько вариантов поведения этой зависимости.

Наиболее тривиальный вариант (кривая  $I$ ) — монотонная зависимость: чем больше плотность ядерной материи, тем меньше удельная энергия связи. Напомним, что на рисунке по оси ординат мы



**Рис. 1.** Зависимость удельной энергии связи, взятой со знаком минус, от плотности ядерной материи. За единицу плотности ядерной материи принята нормальная ядерная плотность  $n_0$

откладываем удельную энергию связи, взятую со знаком минус. После того как кривая *I* пересечет ось абсцисс, то есть уровень нулевой энергии связи, ядерное вещество становится нестабильным и спонтанно рассыпается на отдельные нуклоны.

Кривая *II* предполагает квазистационарное сверхплотное состояние (минимум на кривой), метастабильное относительно перехода в нормальное состояние. Время жизни ядерной материи в этом состоянии точно оценить весьма сложно, однако если это время жизни достаточно велико, то, накопив достаточное количество материи в минимуме на кривой *II*, можно (так же, как и в лазере) спровоцировать ее мгновенный переход в нормальное состояние с выделением значительного количества энергии.

Наиболее интересный случай – кривая *III*. Теория предсказывает существование отдельного мира стабильных сверхплотных ядер при  $n/n_0 = 7$ . Это связано с тем, что энергия связи пиона в ядерной среде растет при увеличении ее плотности. При достаточно большой плотности ядерного вещества энергия связи пионов может стать больше 140 МэВ – массы самого пиона, то есть энергетически выгодным становится самопроизвольное рождение пионов. Хотя проигрыш в энергии за счет рождения пиона составляет 140 МэВ, он перебивается еще большей энергией связи пиона в ядерном веществе. В этом случае структура ядерной материи коренным образом перестраивается и приобретает определенную слоистую структуру – так называемый пионный конденсат. Существенно, что удельная энергия связи нуклонов в преобразовавшемся ядер-

ном веществе в несколько раз (или десятков раз, расчеты при других параметрах теории) превышает обычную энергию связи (см. положение минимума на кривой *III*). Это означает, что нормальные ядра оказываются метастабильны относительно перехода в более плотное состояние и, если создать условия для этого перехода, возможно получение энергии, в десятки раз превышающей энергию, выделяющуюся при термоядерном синтезе или на энергетических реакторах.

### СИНТЕЗ СВЕРХПЛОТНЫХ ЯДЕР НА УСКОРИТЕЛЯХ

В последние годы центр исследований ядерных реакций перемещается на изучение столкновений релятивистских ядер, то есть ядер с кинетической энергией более 1 ГэВ и выше на один нуклон, с неподвижными ядрами мишени или столкновений ядер на встречных пучках (пучков быстрых ядер, летящих навстречу друг другу), правда при меньших энергиях. Основная причина этого перемещения – поиск новых форм ядерной материи.

Кинетическая энергия более 1 ГэВ/нуклон, получаемая на современных ускорителях, соответствует движению ядер-снарядов со скоростью, составляющей 70–99% от скорости света. По теории относительности продольные размеры движущихся ядер сокращаются и соответственно увеличивается их плотность. Далее скорость звука в ядерном веществе (передача сгущений и разрежений в ядерной материи) близка к 20% от скорости света, то есть изучаемые ядро-ядерные столкновения происходят со сверхзвуковой скоростью. Как следствие ядро-снаряд полностью проникает в практически неподвиженную ядро-мишень и за счет совпадения объемов ядер плотность ядерного вещества увеличится как минимум в два раза. Сверхзвуковая скорость ядра-снаряда может стать причиной возникновения в ядре-мишени явления, аналогичного ударной волне в жидкости или газе, когда получаются огромные давления и плотность ядерного вещества может достигнуть величины  $n/n_0 = 4–6$ . Подобно тому как с помощью высоких температур и давлений удается получить такие модификации обычных веществ, как алмазы, реальным может оказаться, что с помощью столкновений ядер большой энергии будет получено новое (пока еще гипотетическое) состояние ядерного вещества – изомеры по плотности.

Для решения обсуждаемой проблемы и получения сверхплотного ядерного вещества с громадным выходом энергии важно убедиться, что при ядро-ядерных столкновениях действительно оказывается справедливым представление о ядерном веществе как о сплошной среде – сжимаемой ядерной жидкости (при больших плотностях внутри ядра нуклоны должны терять свою индивидуальность, обобществляться); тогда можно говорить о давлении,

плотности и температуре этой ядерной жидкости. Не менее важно значение предельных критических температур и давлений для ядерного вещества — температур и давлений, при которых ядерное вещество претерпевает фазовые переходы и последовательно превращается из обычной ядерной материи в сверхплотную ядерную материю — пионный конденсат и т.д.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К сожалению, известные эксперименты не обнаружили стабильного сверхплотного ядерного вещества, а теория не претендует на достоверное описание зависимости удельной энергии связи от плотности ядерной материи. Однако такое состояние не исключает сверхплотных состояний ядерной материи. Предстоит большая работа для решения этой интереснейшей задачи, способной повлиять на жизнь миллионов людей.

Завершая краткое изложение проблемы существования сверхплотного ядерного вещества, еще раз отметим, что лицо современной ядерной физики за последние 15–20 лет существенно изменилось и будет быстро меняться и дальше. Ее развитие вместе с физикой элементарных частиц дает наиболее фундаментальные знания о материальном мире и способно существенно изменить не только наши представления об основах микромира, но и саму жизнь.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Мигдал А.Б.* Квантовая физика для больших и маленьких. М.: Наука, 1989. С. 114–116. (Б-чка “Квант”; Вып. 75).
2. *Окунь Л.Б.*  $\alpha\beta\gamma\dots Z$ : (Элементарное введение в физику элементарных частиц). М.: Наука, 1985. (Б-чка “Квант”; Вып. 45).
3. *Зельдович Я.Б., Хлопов М.Ю.* Драма идей в познании природы. М.: Наука, 1988. С. 115. (Б-чка “Квант”; Вып. 67).
4. *Бердников Я.А., Богданов С.Д., Колыбасов В.М.* Введение в ядерную физику. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1994.
5. *Пенионжкевич Ю.Э.* Физика экзотических ядер // Соросовский Образовательный Журнал. 1995. № 1. С. 92–98.
6. *Лексин Г.А.* Кварки в ядрах // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 12. С. 69–74.
7. *Арбузов Б.А.* Физика подкритического ядерного реактора // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 1. С. 73–78.

\* \* \*

Сергей Дмитриевич Богданов, доктор физико-математических наук, профессор кафедры экспериментальной ядерной физики Санкт-Петербургского государственного технического университета. Область научных интересов: взаимодействие излучения с веществом, экспериментальная ядерная физика, ядро-ядерные взаимодействия. Автор более 150 публикаций.