

3. 14-месячный, или чендлеровский, период есть период собственного колебания земного шара на оси при несовпадении оси вращения с осью инерции. Это колебание то затухает, то опять увеличивается и в среднем за 66 лет совершалось по слабо вытянутому эллипсу с полуосями $0^{\circ},125 = 3,8$ м и $0^{\circ},120 = 3,65$ м. Разные авторы оценивали время релаксации этих колебаний от 10 до 30 лет, но, по-видимому, оно близко к 20—25 годам, и для нового возбуждения затухающих колебаний нужны какие-то воздействия, которые искали в катастрофических землетрясениях или вулканических извержениях, но они, однако, все же слишком слабы для этого.

Что касается векового движения полюсов, то его заманчиво сопоставить с действием так называемой полюсобежной силы, возникающей вследствие вращения Земли и стремящейся сдвигать континенты к экватору. Эта сила пропорциональна высоте данного участка суши над уровнем моря и синусу удвоенной широты, так что на полюсе и экваторе она исчезает, а наибольшего значения достигает на широте $\pm 45^{\circ}$. Если земная кора как одно целое сдвигается на подстилающей ее магме, то равнодействующая всех полюсобежных сил стремилась бы повернуть ее с севера на юг в направлении меридиана 97° восточной долготы. Северный полюс стал бы тогда двигаться относительно коры в обратном направлении, т. е. 83° западной долготы, что очень близко к наблюдаемому. Разные материки тянут кору в разных направлениях, но преобладает действие высочайшего и обширного Тибетского плато. Если такова причина векового движения полюса, то это движение должно было быть и в прошлом таким же, как за последние 70 лет, и будет продолжаться в будущем, пока не изменится в достаточной мере рельеф материков.

Ю. Каган, Е. Г. Бровман. Проблема металлического водорода.

Первоначально интерес к проблеме металлического водорода был связан главным образом с астрофизическими задачами. Начиная с пионерской работы Вигнера и Хантингтона (1935 г.) была опубликована целая серия работ, в которых делалась попытка найти уравнение состояния и проанализировать физические свойства металлического водорода при предельно высоких плотностях. Существенный вклад в разработку этих вопросов был сделан А. А. Абрикосовым¹.

Однако в последнее время проблема приобрела чисто «земной» интерес. Это обусловлено в основном тремя обстоятельствами.

Во-первых, была высказана мысль, что металлический водород должен быть сверхпроводником с высокой температурой перехода. Это утверждение имеет довольно реальное основание, связанное с высокими значениями характерных фононных частот (малая масса иона) и относительно большой величиной константы электрон-фононного взаимодействия (отсутствие ионного остова). Во-вторых, появилась надежда, что металлическая фаза водорода имеет метастабильное состояние. В-третьих, развитие физики и техники высоких давлений сделало реальным постановку вопроса о получении в ближайшем будущем тех громадных давлений, которые необходимы для перехода из молекулярной фазы в металлическую.

Здесь особо следует выделить вторую проблему. Легко понять, что существование достаточно долгоживущей металлической фазы водорода при давлении, равном нулю, имело бы кардинальное значение для многочисленных «земных» приложений.

Анализ вопроса о метастабильной металлической фазе водорода предполагает решение целого ряда связанных между собой проблем:

1. Нахождение энергии металлического состояния водорода и доказательство существования стационарных точек по всем параметрам фазы, в том числе по объему, а также определение структуры, которой отвечает абсолютный минимум энергии.

2. Доказательство динамической стабильности, причем как в длинноволновом пределе (однородная деформация), так и в отношении возбуждений с произвольной длиной волны (действительность частот фононного спектра для всего импульсного пространства).

3. Нахождение уравнения состояния для различных кристаллических фаз и установление соотношения между структурой, получающейся под давлением из молекулярной фазы, и структурой метастабильной фазы при давлении $p = 0$.

4. Определение времени жизни метастабильного состояния.

Для рассмотрения первых трех проблем мы использовали результаты развитой ранее многочастичной теории металлов², применение которой к анализу конкретных непереходных металлов привело к хорошему количественному согласию с экспериментальными данными для широкого круга статических и динамических свойств, включая уравнение состояния во всем доступном интервале давлений и фононный спектр во всем фазовом объеме.

Использование этих результатов для случая металлического водорода облегчается отсутствием проблемы перекрытия ионных остовов, а также отсутствием неопределенности в значении электрон-ионного взаимодействия, которое теперь носи

чисто кулоновский характер, в силу чего в задачу входят лишь универсальные постоянные.

Был проведен анализ энергии металлической фазы водорода как функции непрерывных параметров структуры (параметров элементарной ячейки). При этом для кубических, одноосных и ромбических решеток (для всех 11 решеток Браве) и известных двухатомных структур типа алмаза, β -Sn и плотноупакованной гексагональной структуры задача анализировалась во всей области параметров. Для структур более низкой симметрии использовался метод Монте-Карло в шестимерном пространстве параметров.

Анализ полученных результатов показал:

1) Для металлической фазы водорода характерно наличие области промежуточных плотностей $r_s \sim 1,7$, где $p = 0$ и сжимаемость положительна.

2) Все кубические структуры при $p = 0$ нестабильны в отношении сдвиговых деформаций.

3) Механически устойчивыми оказываются в принципе только сильно анизотропные структуры.

4) Анизотропия обуславливает появление семейств структур, где в рамках отдельного семейства практически отсутствуют энергетические барьеры между различными структурами, а сами структуры переходят друг в друга путем определенного типа деформации. Соответствующий модуль упругости, естественно, близок к нулю.

5) Абсолютный минимум реализуется на «треугольном» семействе структур, которое представляет собой совокупность структур, получающихся из простой гексагональной решетки, если произвести сдвиг узлов параллельно оси c (ось z), сохраняя при этом неизменной гексагональную проекцию на плоскость x, y и расстояния между узлами вдоль z (расстояния между ионами на плоскости x, y заметно больше расстояния между ними вдоль z). Следующим по энергии оказывается «квадратное» семейство, получающееся из простой тетрагональной решетки деформацией того же типа.

6) Если отвлечься от модуля упругости, соответствующего деформации, которая генерирует семейство, то эти структуры обладают длинноволновой стабильностью.

Анализ фононного спектра во всем фазовом пространстве показал, что структуры треугольного семейства обладают полной динамической стабильностью. Учет нулевых колебаний приводит к тому, что треугольное (аналогично — квадратное) семейство структур становится, по-видимому, единой структурой, теряющей кристаллическую симметрию вдоль оси z , но сохраняющую строгую треугольную решетку в плоскости x, y . В результате мы приходим к трехмерному веществу с двумерным порядком. Интересно, что тепловые флуктуации при $T \neq 0$ не разрушают такой двумерной структуры. Это было впервые показано Ландау (см. ³).

Таким образом, следует считать установленной принципиальную возможность существования металлической фазы водорода при $p = 0$, устойчивой в рамках металлического состояния и, по всей видимости, обладающей весьма своеобразной структурой.

С целью анализа свойств металлического состояния под давлением были найдены уравнения состояния для различных кристаллических структур и определена фазовая диаграмма в координатах термодинамический потенциал — давление ($T = 0$). С ростом давления анизотропия энергетически выгодных структур падает в силу возрастающей относительной роли ионной решетки. В пределе астрономических плотностей наименьшая энергия отвечает симметричным решеткам типа ГЦК и ГПУ, которые при больших давлениях становятся устойчивыми. При промежуточных плотностях имеют место фазовые переходы между различными металлическими структурами, в частности при сравнительно низких давлениях происходит переход от «сплюснутых» структур ($\frac{c}{a} < 1$), соответствующих треугольному и квадратному семействам, к «вытянутым»

структурам ($\frac{c}{a} > 1$), из которых по мере возрастания давления минимальной по энергии становится ромбоэдрическая решетка. Переход из молекулярной фазы в металлическую под давлением будет происходить в одну из вытянутых структур. Однако большой разброс результатов для молекулярной фазы не позволяет надежно оценить давление перехода. Так, опираясь только на последние работы, можно получить значения от 3 мегабар до 1 мегабара.

Следует отметить, что металлический водород под давлением обладает жидкостными тенденциями. В случае вытянутых структур это связано с относительно свободным скольжением кристаллических плоскостей параллельно друг другу. В этой связи нельзя полностью исключить, что переход из молекулярной фазы будет происходить в фазу жидкого металла.

Вопрос о времени жизни метастабильного состояния остается открытым. (Это время конечно и при $T = 0$ за счет квантовых эффектов.)

К сожалению, а priori нельзя сделать утверждение, что время жизни будет достаточно большим в силу большой разницы между энергией метастабильной фазы и молекулярной фазы при $p = 0$ (в отношении распада на атомарный водород металлическая фаза оказывается стабильной) и малой массы ионов водорода или дейтерия. Фактором, существенно способствующим стабилизации, является большая разница между плотностями обеих фаз. В связи с этим вопрос о реальной зависимости энергии молекулярной фазы от плотности может стать критическим.

Основные результаты, изложенные в докладе, содержатся в работе ⁴.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Абрикосов, Астрон. ж. **31**, 112 (1954); ЖЭТФ **39**, 1798 (1960); **41**, 565 (1961); **45**, 2038 (1963).
2. Е. Г. Бровман, Ю. Каган, ЖЭТФ **52**, 557 (1967); **57**, 1329 (1969); Е. Г. Бровман, Ю. Каган, А. Холас, ЖЭТФ **57**, 1635 (1969); **61**, 737 (1971).
3. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, Статистическая физика, М., «Наука», 1964.
4. Е. Г. Бровман, Ю. Каган, А. Холас, Препринт ИАЭ-2098 (1971); ЖЭТФ **61**, 2429 (1971).