

О ТЕПЛОВОМ ИЗЛУЧЕНИИ ЮПИТЕРА И САТУРНА

А.А. АТАИ¹, Э.Р. ЮЗБАШЕВ²

¹ Шамахинская Астрофизическая Обсерватория им. Н. Туси НАН Азербайджана,
Баку, Азербайджан
atai51@mail.ru

² Институт Физики НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан

В последнее время успехи в изучении физики низкоразмерных структур, топологических переходов металл-диэлектрик, а также создание современных лабораторий, где возможно получение огромных давлений (~700 ГПа – статическими методами) и (более 1 ТПа – динамическими методами) возобновили интерес к изучению физических процессов, происходящих в недрах гигантских планет, которые являются природными лабораториями для изучения уникальных явлений. Так, в недрах планет-гигантов, в экстремальных условиях (давление 8-40 Мбар, температура ~10000 К) вещество (в основном водород) находится в жидком металлическом состоянии и в зависимости от глубины залегания (от верхних слоев атмосферы до скалистых пород ядра), давления и температуры проявляет диэлектрические (молекулярный водород, в виде газа, жидкости и твердого состояния), полупроводниковые (так называемый «серый» водород в жидком атомарном состоянии) и металлические (металлический жидкий водород в жидком атомарном состоянии) свойства, а также, возможно, высокотемпературные сверхпроводящие свойства.

Известно, что планеты-гиганты излучают больше тепла, чем получают от Солнца. В научной литературе предложены ряд механизмов для объяснения происхождения источника этой внутренней энергии. В данной работе, исходя из некоторых предварительных расчётов, предлагается другой возможный механизм образования тепла в недрах Юпитера и Сатурна, а именно механизм конверсии энергии при превращении орто-водорода в пара-водород.

Ключевые слова: Юпитер, Сатурн, орто- и пара-водород.

ВВЕДЕНИЕ

Газовые планеты-гиганты являются огромными резервуарами водорода в нашей солнечной системе (89% H₂ и 10% He). В таких планетах водород может находиться в экзотических состояниях, например в виде жидкого металла. Несмотря на то, что Юпитер является самой огромной планетой нашей солнечной системы, астрономы не очень много знают о ее происхождении, внутренней структуре, об особенностях излучения ее тепловой энергии, распределения магнитного и гравитационного полей и т.п. Последние десятилетия, в основном, благодаря космическим миссиям отправленных к Юпитеру, получено много новых, более точных данных о самой огромной планете нашей солнечной системы.

О ПРИРОДЕ ТЕПЛОГОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЮПИТЕРА И САТУРНА

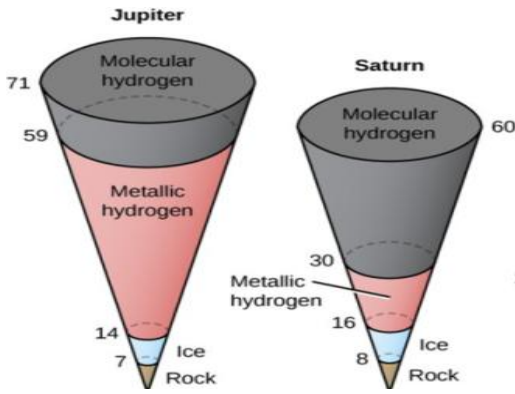
В данной работе рассматриваются газовые планеты Юпитер и Сатурн, имеющие сходную внутреннюю структуру (Рис. 1а) и физико-химические данные.

Под высоким давлением, например, в недрах Юпитера и Сатурна физические характеристики молекулярного водорода становятся необычайно сложными и уникальными. Если мы рассмотрим вертикальный разрез Юпитера и учтем, что основным элементом составляющих массу этой планеты является водород и гелий, то получится следующая картина: после тропосферы Юпитера с углублением в недра планеты давление растет, плотность газа увеличивается и температура тоже повышается. Дальнейшее увеличение давления приводит к ожижению водорода и получается довольно толстый слой

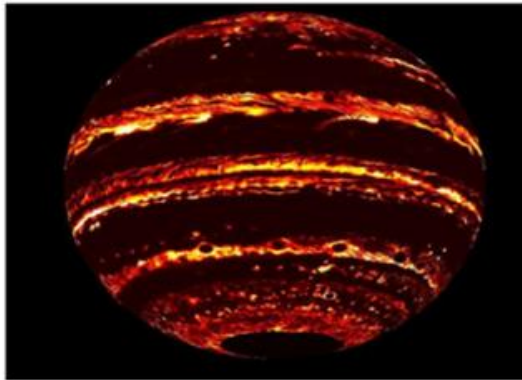
жидкого молекулярного водорода. При экстремальных условиях (P>1.5 Мбар, T~6000 К), под слоем жидкого молекулярного водорода, образуется металлический атомарный слой водорода. То, что жидкий и твердый водород можно сделать металлическими, было предсказано еще в 1935 году Ю.Вигнером и Х.Хантингтоном [1], которые утверждали, что для перехода водорода в металлическое состояние потребуется давление более 250000 атмосфер.

Дальнейшие теоретические работы показали, что металлический водород может иметь сверхпроводящие свойства вплоть до комнатных температур [2]; в некоторых работах [3,4] утверждается, что атомарный металлический водород, в отличие от обычных сверхпроводников и сверхтекучих фаз, является новой формой квантовых жидкостей: сверхпроводящей супержидкостью и металлической супержидкостью. Поэтому, не удивительно, стремление сразу несколько конкурирующих команд физиков в получении этого экзотического вещества в наземных, лабораторных условиях. В некоторых экспериментах был замечен, быстрый переход водорода из прозрачного состояния в состояние блестящего металла, который отражал свет. Недавние эксперименты указали, что при достаточно высоких давлениях перед тем, как перейти в металлическое состояние, водород начинает «темнеть», т.е. водород теряет свою былую прозрачность. Этот "темный" водород является переходным состоянием между диэлектрической и металлической формой водорода, и он очень слабо проводит электрический ток [5]. С точки зрения энергетической зонной структуры газообразный, жидкий и твердый водород являются диэлектриками и, как известно, являются прозрачными в оптическом диапазоне.

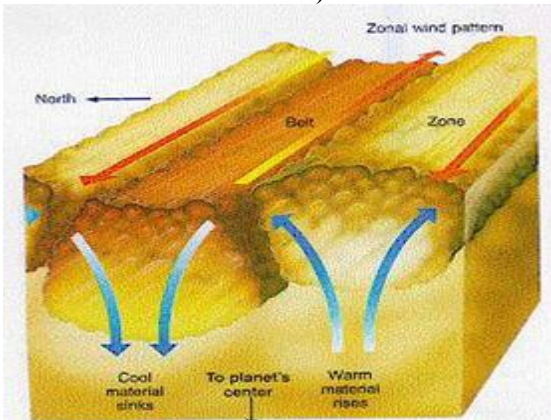
Рис. 1.



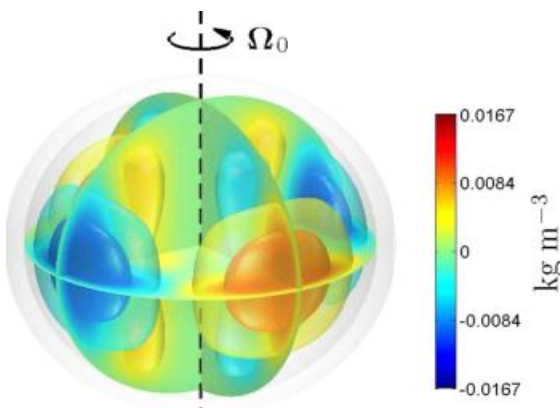
а)



б)



в)



д)

Такое изменение оптических свойств указывает на то, что энергетический зазор между зоной проводимости и валентной зоной уменьшился, т.е. водород перешел из диэлектрического состояния в полупроводниковую. При дальнейшем увеличении давления расстояние между ядрами становится существенно меньше боровского радиуса и становится сравнимой с длиной волны де Бройля электронов. При этом, сила связи электрона с ядром становится нелокализованной, электроны слабо связываются с протонами и формируют свободный электронный газ так же, как в металлах.

Известно, что планеты-гиганты излучают больше тепла, чем получают от Солнца. Например, отношение излученной мощности к поглощенной мощности для Юпитера равно 1,67, а для Сатурна 1,78. Значит, эти планеты имеют внутренние источники тепла. Обычно предполагается, что большая часть этого тепла является остаточной теплотой, связанной гравитационным коллапсом изначальной туманности при образовании солнечной системы, и некоторая часть может быть вызвана продолжаемым медленным сжатием планеты. Если бы тепловая энергия высвобождалась только за счет гравитационного сжатия планеты, это было бы, равномерным процессом происходящем в большом объеме Юпитера и выражалась бы равномерной эмиссией ИК излучения по всей внешней поверхности планеты. Но, пространственное распределение ИК-излучения Юпитера, полученные “Juno” указывают на неравномерное распределение теплового излучения Юпитера во всех деталях, зонах планеты (Рис.1б, [6]). Кроме того, на основе наблюдательных данных по изучению квадрупольных линий H_2 (4-0) по разным деталям диска Юпитера вдоль его меридиана было установлено, что значения давления, температуры и количества молекулярного водорода не подчиняются какой-либо монотонности [7].

Предлагаемая нами модель учитывает некоторые реальные моменты, связанные с внутренним строением Юпитера: основной фазой в объеме планеты является жидкая фаза; в области близкой к поверхности планеты эта фаза в сравнительно узкой полосе переходит в газовое состояние (несколько сот км-ов), притом это сопровождается очень активными динамическими процессами (бури, ветры и другие мощные и масштабные атмосферные явления), конвективные потоки (Рис.1в, [8]); а в области близкой к ядру (5500 км твердые скалистые породы + 2500 км ледяные образования, состоящие из твердых фаз воды, аммиака и других газов) в жидкой фазе «плавают» огромные глыбы льда и твердых пород. Кроме того, основная масса этой жидкой фазы находится в металлическом состоянии. В этом огромном «котле», где имеются значительные градиенты температур и давлений; сильные гравитационные, центробежные, кориолисовы силы возникают великие «миграционные» процессы в виде огромных гидродинамических конвекционных зон, вихрей, потоков огромных размеров (Рис.1д, [9]); если учесть, что металлическая жидкость, вследствие разных динамических процессов обладает также

электродинамическими и магнитодинамическими свойствами, то нетрудно представить себе гамму сложных физических процессов и явлений, происходящем в этом «котле».

Следовательно, кроме источника стационарной энергии, связанной со сжатием планеты, должны существовать и другие локальные, пространственно перераспределенные источники энергии.

Известно, что превращение орто-Н₂ в пара-Н₂ сопровождается выделением тепла (~1400Дж/мол), но без участия катализаторов этот процесс медленный. И в газообразной (сравнительно тонкий слой над областью молекулярного водорода) и в жидкой фазе орто-пара конверсия Н₂ может происходить с заметной скоростью и предварительные вычисления показывают, что энергия, выделенная этим способом, является существенным вкладом в тепловой баланс планеты. Эффективность этого процесса чувствителен к обилию водорода, отношению орто-/ пара-водорода, вертикальной структуре, а также зависимости профиля температур, давлений в атмосферах планет.

Процесс конверсии, происходящий в разных поясах, зонах и в различных глубинах, имеет разные скорости и пространственные масштабы и зависит от температуры, количества ортоводорода

Известно, что эффективность преобразования о-Н₂ в р-Н₂, сопровождаемая выделением тепла, зависит от температуры, давления, обилия водорода, отношения орто- / пара-водорода и т.п., Следовательно, в тех областях, где устанавливаются более благоприятные условия для эффективной конверсии орто- / пара-водорода, выделяется больше тепловой энергии. В зависимости от размеров этой области, «близости» ее к поверхности планеты, а также мощности тепловыделения (механизмы теплопроводности!), «ИК-светимость» будет разной в различных зонах и деталях планеты. Конечно, конвекция теплых и холодных масс в зонах и поясах диска Юпитера также влияют на эти процессы и приводят к чередованию полос этого излучения.

-
- | | |
|---|---|
| [1] <i>E. Wigner, H B. Huntington</i> (1935), <i>J. Chem. Phys.</i> 3, 764 | [6] https://phys.org/news/2017-05-juno-mission-jupiter-science-results.html |
| [2] <i>N.W. Ashcroft</i> , (1968), <i>Physical Review Letters.</i> 21 (26): 1748–1749 | [7] <i>A.A. Atai, E.R. Yuzbashov.</i> (2018), <i>Astronomy & Astrophysics (Caucasus)</i> 4, 27-38. |
| [3] <i>E. Babaev, N.W. Ashcroft</i> , (2007), <i>Nature Physics.</i> 3 (8): 530–533 | [8] http://astronomy.nju.edu.cn/~lixd/GA/AT4/AT411/HTML/AT41102.htm |
| [4] <i>E. Babaev, A. Sudbo, N.W. Ashcroft</i> , (2004), <i>Nature.</i> 431 (7009): 666–668 | [9] <i>Dali Kong, Keke Zhang & Gerald Schubert,</i> (2016), <i>Scientific Reports</i> v.6, 23497 |
| [5] <i>S. McWilliams, D.A. Dalton, M.F. Mahmood, A.F. Goncharov</i> (2016), <i>Phys.Rev.Lett.</i> 116, 255501 | |