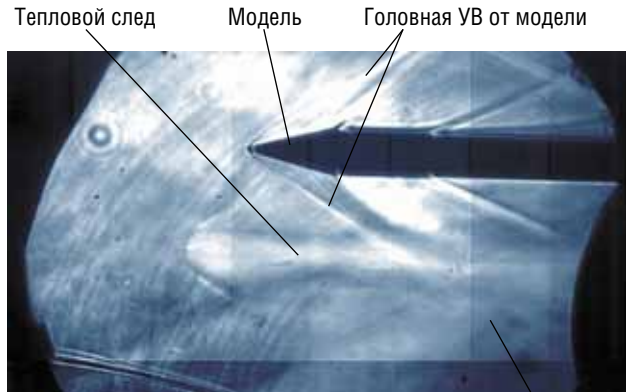


Теневой снимок структуры течения, образующейся при взаимодействии сверхзвукового воздушного потока (число Маха $M = 2$) с плазмой, порождаемым лазерным излучением. Разработанный в ИТПМ CO_2 -лазер в режиме импульсно-периодического излучения выдавал импульсную мощность до 150 кВт. Перед областью оптического пробоя формируется ударная волна как от затупленного твердого тела. За плазмой виден след нагретого воздуха, поперечный размер которого немонотонно изменяется вниз по потоку

волна в результате прохождения слоя газа с низкой плотностью и высокой скоростью звука (обеспеченных нагревом) может существенно ослабляться при определенном соотношении температур в слое и потоке.

Эксперименты по воздействию теплового слоя на УВ, генерируемую модельными объектами, проводились на малогабаритной аэродинамической установке, где создавался сверхзвуковой воздушный поток поперечным размером 100 мм. Тепловой слой формировался излучением газового CO_2 -лазера, разработанного в ИТПМ, со средней мощностью до 4,5 кВт (ускоренные темпы развития лазерной и СВЧ-техники позволяют рассматривать эти устройства как наиболее перспективные бортовые источники энергии). Подвод энергии излучения в сверхзвуковой поток воздуха возможен в области *оптического пробоя*. Этим термином принято обозначать переход газообразного вещества в состояние плазмы под воздействием электромагнитного поля оптической частоты. Для реализации эффекта необходима интенсивность лазерного излучения порядка $10^9 - 10^{10}$ Вт/см² за время 0,3–1 мкс. Обеспечить такие экстремальные параметры пока возможно только в режиме повторяющихся (с частотой 80–100 кГц) импульсов сфокусированного излучения. При этом в воздушном потоке возникают сгустки плазмы (*плазмиды*) с температурой 20–30 тыс. градусов. За плазмой образуется тепловой след.



Теневой снимок структуры течения при взаимодействии области оптического пробоя с возмущенным течением, генерируемым моделью в виде конуса на цилиндре. Наблюдается прошедшая тепловой слой УВ от модели и заметное изменение структуры потока за падающей УВ. Течение за ударной волной при входе в тепловой слой переориентируется по направлению набегающего потока

В первых экспериментах внимание исследователей было сосредоточено на изучении особенностей структуры течения, формирующейся при взаимодействии с плазмой потока воздуха, скорость которого в 2 раза превышала скорость звука.

Следующим важным этапом работы стал анализ взаимодействия области оптического пробоя (разряда) с возмущенным течением, генерируемым моделью в форме конуса. В области взаимодействия на фоне нестационарного течения фиксировались моменты исчезновения УВ, прошедшей тепловой слой. Наблюдения велись с помощью оптического теневого прибора и скоростной видеокамеры.

Наблюдаемые изменения структуры течения указывают на явное ослабление интенсивности головной УВ, генерируемой моделью. Попутно отметим, что согласно оценкам ударная волна от самого плазмиды уже при небольших удалениях существенно слабее, чем от модели.

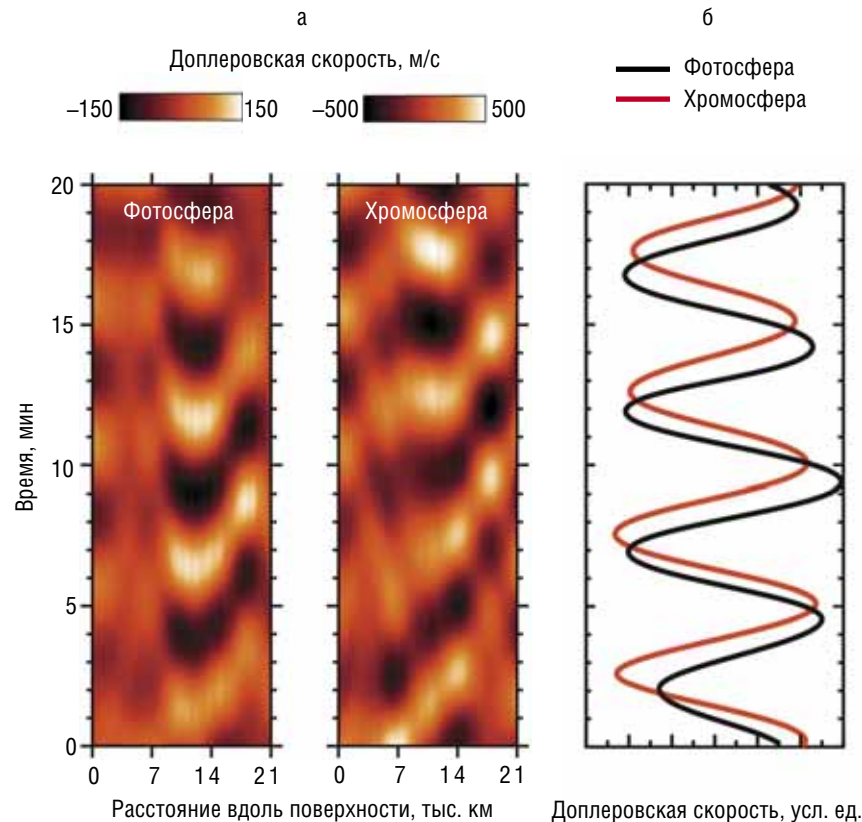
Сейчас исследования направлены на получение количественной информации об эффективности воздействия теплового следа плазмиды на параметры ударной волны. Для этого планируется выполнить прямые измерения распределения давления в воздушном потоке.

К. т. н. В. Ф. Чиркашенко
(Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, Новосибирск)

Волны в корональных дырах на Солнце

Группе ученых из Института солнечно-земной физики СО РАН (Иркутск) удалось обнаружить распространяющиеся плазменные волны в основании солнечных корональных дыр. Усилиями нескольких российских научных коллективов с участием зарубежных коллег показано, что фотосферные волны проникают в корону Солнца благодаря параметрическому резонансу этих волн с собственными колебательными модами магнитных структур короны. Результат признан важнейшим за 2008 г. по секции «Солнце» Астрономического совета РАН.

Нагрев *солнечной короны* – самой внешней оболочки нашего дневного светила – давняя проблема астрофизики. То же можно сказать о большинстве звездных атмосфер. Твердо установлено, что видимая невооруженным глазом поверхность Солнца (*фотосфера*) имеет температуру около 5800 К, тогда как верхняя *хромосфера* – слой, расположенный на 2–3 тыс. км выше, – нагрета до 20 000 К, а в *короне* температура отдельных участков достигает уже 4 млн градусов. Каким же образом относительно «холодная» фотосфера разогревает вышележащие слои солнечной атмосферы?



а) Пространственно-временные диаграммы доплеровской скорости в фотосфере и хромосфере Солнца иллюстрируют процесс распространения плазменных волн в основании корональных дыр. Цветовая шкала дает представление об амплитуде колебаний; темные участки – движение от наблюдателя, светлые – к наблюдателю. б) По запаздыванию колебаний в хромосфере определялась скорость распространения волн из фотосферы в хромосферу

Второй закон термодинамики исключает возможность прямого теплопереноса из фотосферы в более горячую корону. Это означает, что транспортировка энергии осуществляется другим способом.

В настоящее время рассматриваются два возможных механизма, претендующих на роль «поставщика» энергии в корону. Оба механизма могут действовать как самостоятельно, так и совместно. Первый – магнитные поля, пронизывающие солнечную атмосферу до больших высот и способные накапливать и высвобождать значительную энергию. Второй – *плазменные волны*, порождаемые конвективными движениями в подфотосферных слоях и другими динамическими процессами. В зависимости от преобладающей восстанавливающей силы (силы, стремящейся вернуть плазму в состояние равновесия) волны могут быть звуковыми (волны упругости), гравитационными или магнитными. Часто эти силы действуют одновременно, и мы имеем дело с самыми настоящими волнами-кентаврами: магнитозвуковыми, акустогравитационными и т. д.

Чтобы изучать колебательно-волновые процессы на Солнце, требуются крупные солнечные телескопы, оснащенные высокочувствительными спектрополяриметрами. Согласно *эффекту Доплера* движения излучающих сгустков плазмы от наблюдателя и к наблюдателю соответственно увеличивают или уменьшают длину волны спектральной линии, смещая ее от начального положения (чем больше скорость, тем больше смещение). Аппаратура, которой располагает Институт солнечно-земной физики в Иркутске, способна зарегистрировать вариации, составляющие менее одной десятиллионной от длины волны излучения. Выполняя синхронные измерения на нескольких специально подобранных спектральных линиях, можно получать высотные разрезы доплеровской скорости в интервале высот фотосфера–хромосфера (который составляет около 2000 км) для объектов солнечной атмосферы с разной конфигурацией магнитного поля.

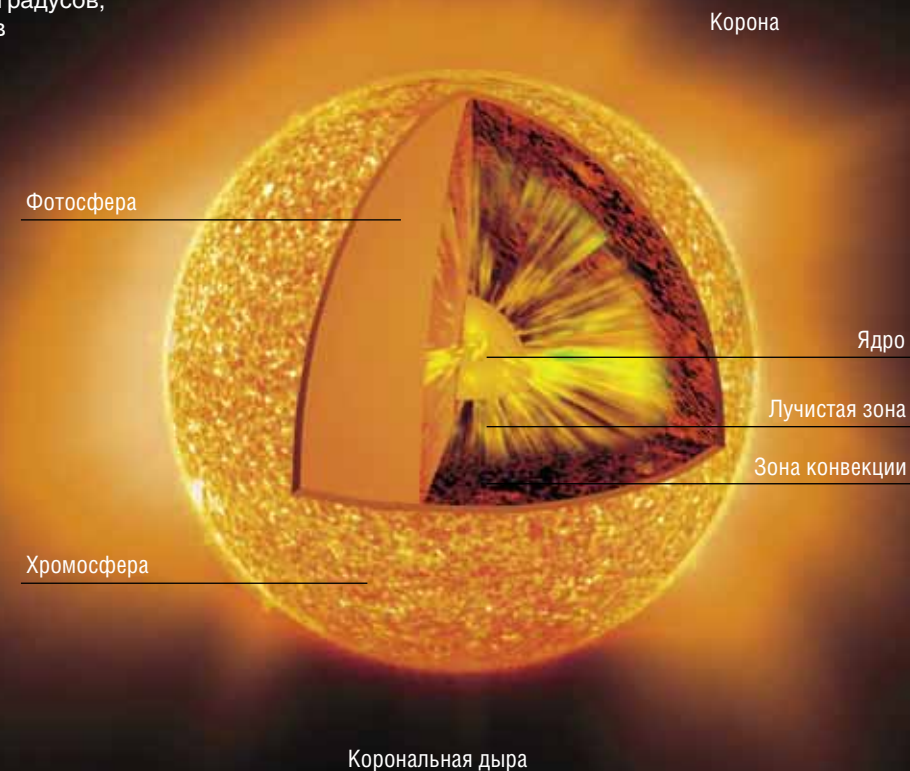
Наиболее крупные и интересные среди этих объектов – *корональные дыры* (КД).

Своим названием корональные дыры обязаны тому, что в рентгеновском и крайнем ультрафиолетовом диапазоне они выглядят как темные провалы в яркой короне. Их связывают с крупномасштабными магнитными структурами, имеющими открытую конфигурацию магнитного поля, т. е. такую, при которой силовые линии фотосферного магнитного поля перпендикулярны поверхности и сохраняют это направление при выходе во внутреннюю корону. Кстати, играющий столь важную для Земли роль *солнечный ветер* – поток заряженных частиц от Солнца – истекает именно из КД.

Для детального изучения отдельных колебательных мод мы применили методы частотной фильтрации, позволяющие из шумоподобной смеси квазистационарных движений и разнообразных колебаний выделять интересующие нас составляющие и с помощью обратного преобразования восстанавливать их исходное пространственно-временное распределение. Оказалось, что такая операция особенно полезна для выявления распространяющихся волн. Нам удалось обнаружить и зарегистрировать убедительные проявления распространяющихся вверх волн непосредственно в основании корональных дыр.

На присутствие волновых движений такого рода указывают повторяющиеся наклонные полосы на пространственно-временных диаграммах доплеровской скорости. Расстояния между полосами вдоль оси времени соответствуют периоду колебаний, а угол между полосой и осью времени связан с горизонтальной проекцией скорости распространения (чем больше угол, тем больше скорость). Скорость распространения волны из фотосферы в хромосферу определялась по среднему времени запаздывания сигналов доплеровской скорости. В итоге выяснилось, что доминируют волны с 5-минутным периодом (*фундаментальная фотосферная мода*), хотя нередко наблюдались и ос-

Общепринятая схема строения Солнца. Прямым наблюдениям доступны только внешние слои, начиная с фотосферы. Температура фотосферы – 5800 К, хромосферы – 10–20 тыс. градусов, короны – 1–4 млн градусов



цилляции с периодом 10–15 минут. Измеренная фазовая скорость составила 40–45 км/с для экваториальной КД и 70–80 км/с – для полярной.

Усилиями нескольких научных коллективов (ИПФ РАН, ИСЗФ СО РАН, ГАО РАН, ННГУ, Технический университет Хельсинки) с привлечением данных радиодиапазона было показано, что проникновение фотосферных волн в корону Солнца возможно в результате *параметрического резонанса* этих волн с собственными колебательными модами магнитных структур короны. И как часто бывает, новых вопросов возникает больше, чем ответов на уже поставленные.

В будущем предстоит выяснить, какая часть энергии плазменных волн расходуется на нагрев короны, а какая – уносится солнечным ветром? Не играют ли корональные дыры в этом случае роль своеобразного энергетического клапана, регулирующего степень нагрева короны? Можно надеяться, что полученный в 2008 г. совместный грант РФФИ и Королевского астрономического общества Великобритании, объединяющий силы российских экспериментаторов и английских теоретиков, поможет продвинуться в решении этой проблемы.

Д. ф.-м. н. Н. И. Кобанов, А. А. Скляр
(Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск)