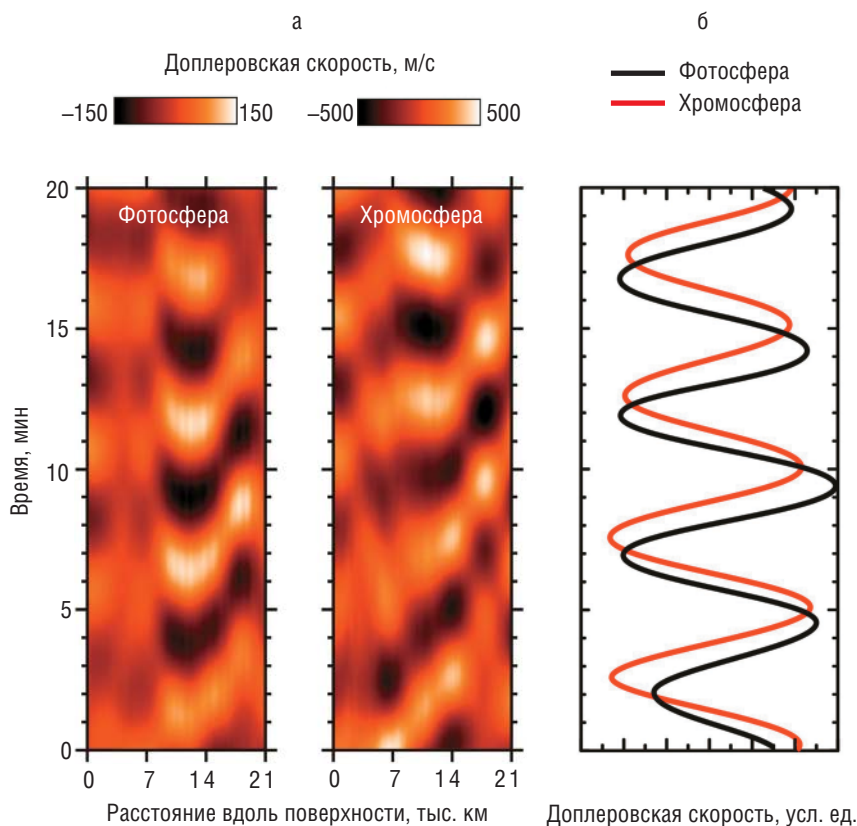


Волны в корональных дырах на Солнце

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?



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 высвободить 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.

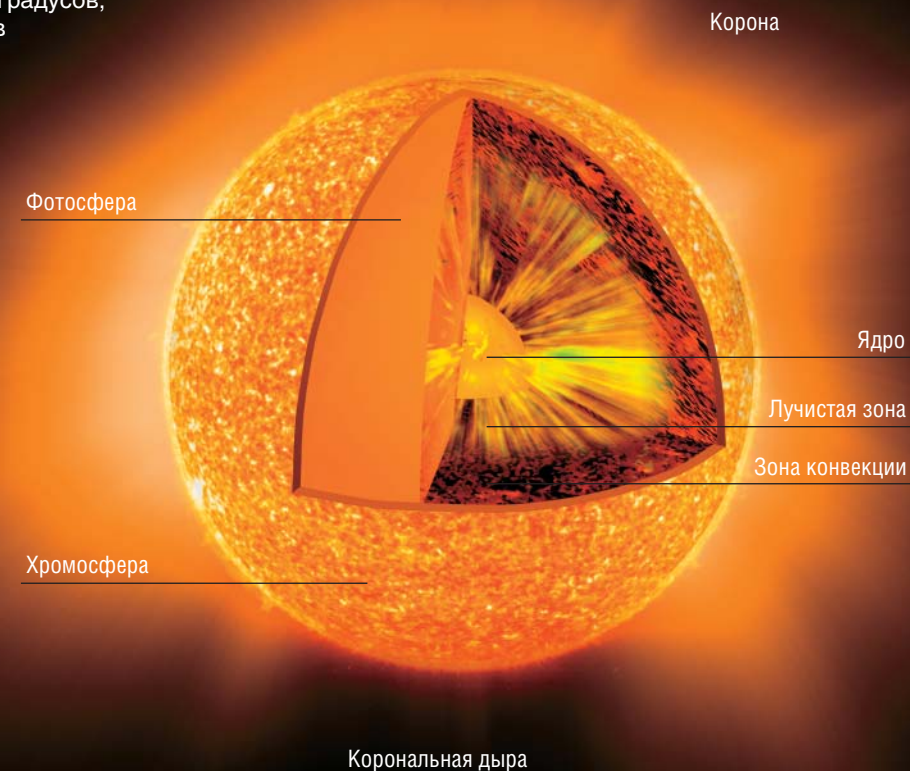
Наиболее крупные и интересные среди этих объектов – *корональные дыры* (КД).

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. Складар
(Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск)