ее механической и электромагнитной частей в отдельности обладают неопределенностями

$$\Delta E_{\rm e} = \Delta E_m \approx \frac{\hbar \omega_{\rm e} x_0}{2 d},\tag{8}$$

где  $x_0$ —неопределенность координаты механического осциллятора в его основном состоянии. Этот результат качественно легко объясняется наличием неопределенности частоты контура в силу ее зависимости от x.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Casimir H.B.G. // Ргос. Коп. Ned. Acad. Wet. 1948. V. 51. P. 793.

2. Levitov L.S. // Europhys Lett. 1989. V. 8, No. 6. P. 499.

3. G. Barton // J. Phys. A. 1991. V. 24. P. 991.

- 4. Braginsky V.B., Khalili F. Ya. // Phys. Lett. A. 1991. V. 161. P. 197.
- 5. Braginsky V.B., Khalili F. Ya.// Phys. Lett. A. 1992. V.167. P. 1.

А.С. Гадун, В.Н. Карпинский. Проблемы структурности Солнца и звезд. Сложная система структур присуща всем слоям и образованиям на Солнце и звездах. "Бесструктурной" стандартной солнечной модели (SSM) свойственна неустойчивость в ядре. Оно должно эволюционировать через возникновение неоднородностей и движений [1]. Нестационарность потока солнечных нейтрино в июле 1991 г. была зарегистрирована обоими независимыми нейтринными экспериментами SAGE и GALLEX и составила 300 SNU при фоновом значении 75 SNU и величине 132 SNU для SSM [2]. Реальность тонкоструктурных неоднородностей в радиоактивном ядре и основании конвективной зоны обсуждались в работах [3, 4]. Существенные неоднородности плотности внутри Солнца могли бы быть обнаружены из точных



Рис. 1. Система структур солнечной фотосферы.  $k_n$  — горизонтальное волновое число,  $\omega$  — циклическая частота. I — микротурбулентность, II — "точечные" гранулы, филигри, "точечные" магнитные трубки

измерений формы поверхности гравитационного потенциала вблизи Солнца. Вверху конвективной зоны образуются основные регулярные структуры солнечной фотосферы: супергрануляция, мезогрануляция и грануляция (рис. 1).

В основе исследований тонкой структуры Солнца лежат оптические наблюдения с высоким пространственным разрешением в доли секунды дуги (менее 500 км на поверхности Солнца). Фотоснимки Советской стратосферной солнечной обсерватории уже 20 лет остаются непревзойденным по качеству источником новой информации. Большой ценный материал был получен с 1978-го по 1988 г. в Памирской экспедиции ГАО АН СССР на телескопе "ПАМИР". Измерения контуров спектральных линий с точностью до 0,1 %, их бисекторов, характеризующих асимметрию линий и содержащих основную информацию, позволили изучать неразрешенную тонкую структуру не только на Солнце, но и на звездах [5].

Значение теории было мало, а теоретические прогнозы — неудачными. С начала 80-х годов появились возможности для трехмерного численного моделирования структур на основе решения уравнений сохранения в самой общей форме [6, 7]. Результаты его допускают непосредственное сравнение с наблюдательными данными. Физичность и приближенность моделей к реальности сочетаются с ограничениями. Они связаны с невозможностью моделировать с достаточной детальностью большой объем, а также лучистый селективный перенос энергии в неоднородной среде. При этом входит произвольность в задание граничных условий и подсеточной турбулентной вязкости. Численные модели стали важным инструментом исследования.

Остановимся на ключевых наблюдательных фактах [8]:

1. Средняя квадратичная величина неоднородностей относительно средней яркости для центра солнечного диска составляет 22%. Наша оценка существенно превосходила предшествующие.

2. Величина неоднородностей яркости монотонно и медленно спадает от центра к краю солнечного диска до 6%. Впервые тонкая структура была обнаружена на самом краю солнечного диска и даже "за краем" точкой перегиба фотометрического профиля края.

3. Движения со скоростями порядка 1 км/с свойственны всей толще фотосферы. Для спектральных линий, образующихся в интервале высот от 50 до 250 км над уровнем видимой поверхности солнечного диска, наблюдается высокая корреляция допплеровских сдвигов линий. Структура скоростей здесь однородна по высоте и состоит из вертикальных цилиндрических колонок. Выше такая структура резко нарушается в тонком слое в несколько десятков километров, как будто вертикальные потоки встречают некую преграду.

4. Неоднородности яркости в непрерывном спек-



Рис. 2. Схема тонкой структуры солнечной фотосферы (верти-кальный разрез)

тре и в спектральных линиях резко различаются. Построенные для вертикального сечения фотосферы карты показали, что структуры яркости сильно неоднородны по высоте уже в интервале высот в 70 км, существенно трехмерны, сложны и разнообразны. Границы светлых и темных образований сильно наклонены к вертикали на углы более 80°.

Характеры структур яркости и скорости качественно различны. Преимущественный подъем горячего вещества и опускание холодного свойственны только самым низким слоям фотосферы. Типично вращение ярких элементов структуры, гранул, в вертикальной плоскости.

5. Фотосферное поле яркости хорошо представляется совокупностью двумерных односвязных светлых гранул и темных порул импульсов яркости, начинающихся с определенного уровня яркости, "стартового", вверх и вниз от него. Стартовый уровень расположен от 4 до 10% ниже среднего уровня яркости поверхности фотосферы, и часть лучистого потока связана с тонкой структурой. Структура фотосферного поля яркости хорошо организована и отличается как от "чисто случайного" гауссова поля, так и от обычно принятой ячейковой картины "униполярных" ярких образований-гранул, разделенных неограниченной сеткой узких темных промежутков.

**6.** За время, меньшее среднего времени жизни гранул 5 мин на площади 4 • 10<sup>8</sup> км<sup>2</sup>, содержащей около 300 гранул, число их когерентно изменяется в 1,5 раза. В противофазе с ним меняется общая площадь, занятая гранулами, и в 2 раза — средняя площадь гранул [10]. Достоверное изменение математического ожидания числа гранул сопровождается уменьшением их случайных флуктуаций, характерным для автоволн в стохастических нелинейных ансамблях. Разброс наблюдательных данных может быть отражением обнаруженной нестационарности. Зарегистрированы аналогичные колебания радиоизлучения, связанные, вероятно, с изменением структуры нижней хромосферы [11].

7. Иной подход был использован группой исследователей: П. Брандт, А. Тайтл, Г. Шармер и др. [12]. Скалярному полю яркости ставится в соответствие векторное поле скоростей фронтов яркости из него выделяют различные пространственно-временные компоненты, оценивают дивергенцию, циркуляцию, завихренность, прослеживают линии тока методом пробных частиц "corkpattera". По материалам наблюдений создан впечатляющий компьютерный фильм и морфодинамическая модель [13]. Полю яркости присущи устойчивые "токи" большего масштаба, линии и точки "стока", вихревые структуры [14]. Сделанный вывод об определяющей роли "взрывающихся гранул" не подтверждается на нашем материале. Отметим, что отождествление движений фронтов яркости с реальными горизонтальными движениями вещества в фотосфере неправомочно. Однако, несмотря на феноменологичность, полученые результаты очень важны. Они свидетельствуют о жестких закономерностях в кажущейся "случайной" картине эволюции гранул.

Существует качественное согласие результатов численного моделирования с наблюдениями. Средние квадратичные величины неоднородностей яркости дают большой разброс как для наблюдательных, так и для модельных оценок от 10 до 30%. Ряд характеристик не может быть надежно сопоставлен из-за малости моделируемого участка.

Суммируя результаты, приходим к такой картине структур (рис. 2).

В нижней фотосфере (*h* = 0—50 км) структуры скорости и температуры совпадают. Только здесь понятие "гранула" имеет смысл для обозначения элемента трехмерной структуры. Существенную роль здесь играет конвекция.

В средней фотосфере (h = 50 - 250 км) сохраняется колонковая структура скоростей, которая уже не коррелирует со сложными неоднородными по высоте структурами температуры. Нельзя говорить и о единой ячеестой структуре. Происходит отток вещества через неподвижную границу гранулы, как структурного образования, сопровождающийся его интенсивным охлаждением (5–10 К/км). Это конвективно устойчивая область проникающей конвекции. Горячие поднимающиеся потоки быстро высвечиваются, опускающиеся же, наоборот, из-за сжатия разогреваются. Подниматься может и охлажденное вещество.

На высоте 250 км колонковая структура скоростей резко нарушается. В верхнюю фотосферу конвективные движения грануляционного масштаба непосредственно не проникают, но могут порождать вторичные движения волны [15]. На высоте 350 км края диска могут быть видны неоднородности плотности, связанные с магнитными трубками (Ф. Кнеер, 1991 г.) или отклонениями от гидростатического равновесия. Здесь и выше неоднородности могут иметь неконвективную природу (облака СО и

Н<sup>—</sup>), порождать нетепловую энергию, нагревающую хромосферу и корону [16, 17].

Какова тонкая структура атмосфер других звезд и как она изменяется с эволюцией Солнца? Для ответа на этот вопрос были выполнены обширные измерения контуров спектральных линий для ярких звезд с высокой точностью и оценки формы их бисектора [18, 19]. Характер структур зависит прежде всего от эффективной температуры звезды. В фотосферах звезд солнечного типа верхняя граница расположена на уровне излучающего слоя  $\tau_{\mathbf{R}} = 1$ , а структуры фотосферы являются эпифеноменом конвекции. В более горячей фотосфере Проциона грануляция носит более контрастный "открытый" характер; горячие восходящие конвективные потоки распространяются в верхнюю фотосферу до  $\tau_{\rm R} = 10^{-3}$ ; качественно меняется форма бисектора. Для более холодных звезд грануляция "притоплена", верхняя граница конвекции расположена под излучающим слоем. Для звезд ранних спектральных классов форма бисектора инверсная, а природа и морфология грануляции качественно отличны от солнечной.

## Выводы:

1. Мелкомасштабные неоднородности образуют организованную диссипативную структуру, связаны с генерацией, переносом и освобождением нетепловой энергии — фундаментальными процессами на Солнце и звездах.

2. Создана надежная и достаточно полная система наблюдательных фактов. Необходимо их обобщение в динамических моделях разных уровней, физических и феноменологических; разработка теории структур, формулировка новых ключевых наблюдательных задач. Особый интерес представляют вихревые "полярные" структуры; неоднородность и нестационарность "спокойной" атмосферы Солнца; характер взаимодействия структур разных уровней, от "сверхтонкой" до гигантской, их неиерархичность, коллективные процессы в тонкой структуре и ее определяющая роль в крупномасштабных и глобальных явлениях.

3. Новые методы адаптивной поляриметрии создают возможности для прямых исследований тонкой структуры магнитных полей с учетом их неразрешенной "сверхтонкой" структуры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Gough D. // Phys. world. July 1992. P. 21.
- 2. Wark D. // Phys. world. July 1992. P. 20.
- 3. Вандакуров Ю.В. // Письма Астрон. ж. 1984. Т. 10. С. 873.
- 4. Dzembovski V.A., Goode P.R. // Astrophys. J. 1991. V. 376. P. 782.
- Атрощенко И.Н., Гадун А.С., Костык Р.И // Вариации глобальных характеристик Солнца. Киев: Наукова думка, 1990. С. 182.
- 6. Stein R.F., Nordlund A. // Asttophys. J. 1989. V. 342. P. 95.
- Атрощенко И.Н. Неоднородные гидродинамические модели солнечной фотосферы. Киев, 1992. Препринт // АН Украины. Главная астрономическая обсерватория: ГАО-92-2Р.
- Karpinsky V.N. // Solar Photospere: Structure, Convection and Magnetic Fields. Proc. 138th Symposium IAU. Dordrecht; Boston; London: Kluver Acad. Publ., 1990. P. 67.
- 9. Парфиненко Л.Д. // Солнечные данные. 1985. № 8. С. 68.
- 10. Karpinsky V.N. // Nature. 1989. V. 341, No. 6240. P. 31.
- 11. *Цветков Л.И., Тарасова Т.Н. //* Изв. Крымской астрофиз. обс. 1988. Т. 80. С. 130.
- Spruit H.C., Nordlund A., Title A.M. // Ann. Rev. Astron. and Astrophys. 1990. V. 28. P. 263.
- Simon G.W., Title A.M., Weiss N.O. // Astrophys. J. 1991. V. 375. P. 775.
- 14. Brandt P.N. et al. // Nature. V. 335, No. 6187. P. 238.
- Komm R., Mattig W., Weiss A. // Astron. and Astrophys. 1991. V. 252. P. 812.
- Kneer F. // Small-scale Dynamical Processes in Quiet Stellar Atmospheres / NSO Sac Peak Sunspot, 1984. P. 110.
- Bialko A.N., Avrett E.H. // A Mechanism for Chromospheric Heating by Fast Electron Generated in the Temperature Minimum Region. Preprint. The Academy of Science of USSR L.D. Landau Institute for Theoretical Physics. Chemogolovka, 1985.
- 18. Gray D.F., Nagel T. // Astrophys. J. 1989. V. 311. P. 421.
- 19. Dravins D. // Astronom. and Astrophys. 1987. V. 112. P. 21.
- Dravins D., Nordlund A. // Astronom. and Astrophys. 1990. V. 228. P. 203.
- 21. Dravins et al. // Astrophys. J. 1993 (in press).
- Атрощенко Й.Н., Гадун А.С., Костык Р.И. // Астрофизика. 1989. Т. 31, № 3. С. 590.