Стандартная солнечная модель: влияние непрозрачности и распределения водорода.

Батурин В.А. и Аюков С.В.

Аннотация. Для сравнения моделей внутреннего строения Солнца предлагается использовать содержание гелия Y вне энерговыделяющего ядра и величину удельной энтропии S_{cnv} вещества адиабатической части конвективной зоны. Изучается влияние изменений непрозрачности и профиля химического состава на положение моделей в плоскости (Y,S_{cnv}). Обнаружено, что изменения в профиле химического состава и непрозрачности в энерговыделяющем ядре не выводят модели за пределы некоторой линейной зависимости в плоскости (Y,S_{cnv}). Увеличение непрозрачности в лучистой зоне ведет к смещению этой зависимости к более высоким Y.

Standard solar model: influence of the opacity and the hydrogen profile

by Baturin V.A. and Ajukov S.V.

Abstract. We propose to use the surface helium abundance Y and the specific plasma entropy S_{cnv} in the adiabatic part of the convective zone for the solar model comparison. The influence of the opacity and the hydrogen abundance profile modifications on the model position on the (Y,S_{cnv}) plane is discussed. It is revealed that such variations (when localized in the energy-generating core) shift the solar model along a straight line. Opacity increasing in the radiative zone results in shift of this line to higher Y.

I. Введение

Как известно, основным способом расчета внутреннего строения Солнца на сегодняшний день является эволюционное моделирование. Благодаря тому, что для Солнца одновременно известны возраст, масса, радиус и светимость, можно рассчитать эволюционный трек нашего светила от начального химически однородного состояния до настоящего времени [1]. При этом часть параметров модели определяется из условия согласования радиуса и светимости модели с радиусом и светимостью современного Солнца. Так определяются начальное содержание гелия Y и параметр теории конвекции (не имеющий большого самостоятельного значения в силу приближенности конвективной теории). Однако целый ряд физических предположений, используемых при расчетах, полагаются известными из независимого теоретического анализа – прежде всего непрозрачность вещества, сечения ядерных реакций и характер эволюции. Влияние неопределенности таких предположений на окончательную модель детально неизвестно, несмотря на большое число стандартных моделей, рассчитанных в последнее время [2–7]. Проведению анализа влияния мешает отсутствие сопоставимого физического параметра, характеризующего строение модели и эквивалентного параметру теории конвекции. В данной работе предлагается использовать в качестве такого параметра энтропию глубоких слоев конвективной зоны S_{cnv} и рассматривается вопрос о влиянии непрозрачности и профиля химического состава на модель с точки зрения Y и S_{cnv}.

II. Энтропия адиабатической части конвективной зоны как параметр модели

Верхние 30% радиуса Солнца занимает конвективная зона. Обычно строение этой области принято характеризовать параметром теории конвекции — отношением длины пути перемешивания к шкале высот по давлению [1]. Однако детали конвективной теории играют роль лишь в очень узком диапазоне глубин на Солнце — около 700 км (0.1% от радиуса). Остальная часть конвективной зоны стратифицирована адиабатически, т.е. градиент температуры в ней практически равен адиабатическому. Из этого следует, что энтропия вещества в этих слоях S_{cnv} (т.е. на протяжении почти всей конвективной зоны — около 30% радиуса) постоянна.

Величина энтропии S_{cnv} является ключевым физическим параметром, определяющим строение почти всей конвективной оболочки. В самом деле, пусть температура будет независимой переменной. Тогда ход плотности во всей адиаба-

тической части определится адиабатой $S=S_{cnv}$, вследствие этого распределение массы и радиуса также будет определено. В моделях с фиксированной энтропией могут отличаться лишь самые верхние части — атмосфера и зона сверхадиабатической конвекции; однако вследствие малой толщины и массы эти слои не могут оказать заметное влияние на строение модели в целом. Итак, S_{cnv} является главным калибровочным параметром, определяющим возможность согласования оболочки и ядра при расчете полной модели, параметр конвекции же не определяет энтропию, а лишь подбирается для достижения нужного ее значения в процессе расчета эволюционной модели.

Очевидно также, что S_{cnv} связана с глубиной конвективной зоны при заданных непрозрачностях: в соответствием с критерием Шварцшильда конвекция прекращается там, где адиабата достигает областей температуры и плотности, в которых коэффициент поглощения вещества достаточно мал. Все параметры конвективной зоны (глубина, параметр конвекции, S_{cnv}) оказываются взаимосвязанными.

Поскольку термодинамическая энтропия определена с точностью до постоянной, удобно использовать относительную энтропию, отсчитываемую от фиксированной точки. В нашей работе принято, что при температуре T=4300 K, плотности $\rho=10^{-9}$ г/см^3, содержании водорода (по массе) X=0.73 и элементов тяжелее гелия Z=0.02 энтропия вещества равна нулю. Для остальных значений T,ρ,X энтропия вещества рассчитывается путем интегрирования ее термодинамического дифференциала от приведенной начальной точки до требуемой.

III. Соотношение между Y и S_{cnv}

Ряд физических предположений, используемых при построении эволюционных моделей Солнца в настоящее время, недостаточно точны; среди них — плохо известные непрозрачности, возможное наличие перемешивания в солнечном ядре, неточность сечений ядерных реакций. Мы применили предложенный выше параметр S_{cnv} к анализу влияния на модель непрозрачности и профиля химического состава.

Для исследования влияния первого эффекта была рассчитана серия моделей с искусственно модифицированным коэффициентом непрозрачности в лучистых недрах (в конвективной зоне непрозрачность не влияет на строение модели). Перемешивание имитировалось искажением профиля содержания водорода в зоне ядерных реакций. Модель приводилась к солнечным значениям радиуса и светимости путем подбора параметра конвекции (и, следовательно, S_{cnv}) и содержания гелия Y в поверхностных слоях; начальный профиль содержания гелия брался из стандартной модели Солнца (таким образом, модифицированные модели не являются эволюционными).

Отображение полученных моделей на плоскость (Y,S_{cnv}) (рис. 1) показало, что при локализации изменений в энерговыделяющем ядре существует линейная (в разумном диапазоне изменений —

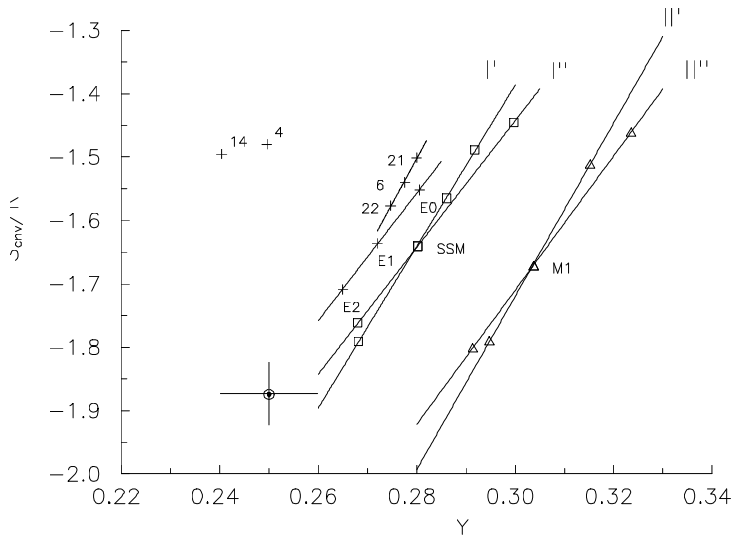

Рис.1. Соотношение между содержанием гелия Y и энтропией адиабатической части конвективной зоны S_{cnv}.

Квадраты и треугольники соответствуют моделям, рассчитанным в данной работе, крестики — модели из [2] (нумерация та же, что и в [2]), кружок с точкой в центре — определенные гелиосейсмологическими методами значения [12] (показаны оценки погрешности определения). Рассчитанная нами стандартная эволюционная модель — SSM. Прямые I', I" соединяют модели (квадраты) с измененными в ядре X и κ; прямые II', II" — модели (треугольники) с дополнительной коррекцией непрозрачностей в лучистой зоне. Один штрих соответствует изменению X, два — κ. R — универсальная газовая постоянная.

около 10% по Y и 50% в непрозрачности) зависимость между Y и S_{cnv}. На этом рисунке прямая I' соединяет модели, полученные модификацией профиля содержания водорода, I" — изменением непрозрачности в зоне энерговыделения. Точка SSM представляет стандартную (немодифицированную) эволюционную солнечную модель. С другой стороны, при изменении непрозрачности в лучистой зоне (выше зоны энерговыделения) модель перемещается по плоскости (Y,S_{cnv}) в других направлениях (например, от SSM к M1). При этом сохраняется наклон прямой, описывающей поведение модели при изменении энерговыделяющей зоны: прямые I', I" перемещаются параллельно самим себе, переходя в II' и II" соответственно. Таким образом, модификация модели в ядре описывается перемещением вдоль прямых I', I", в лучистой зоне – параллельным переносом этих прямых. Это позволяет предсказывать поведение стандартной модели Солнца на плоскости (Y,S_{cnv}) при изменении непрозрачности и профиля содержания водорода.

Нами также были рассмотрены модели, рассчитанные в [2] (нанесены крестиками на рис. 1). Энтропия конвективной зоны была оценена нами по данным, любезно предоставленными Й.Кристенсеном-Далсгаардом. В моделях 4 и 14 использованы таблицы непрозрачностей Cox, Stewart 1970 [8] + Cox, Tabor 1976 [9] (CS70+CT76), в остальных – Лос-Аламосские таблицы LAOL [10]. Наша стандартная модель (SSM) рассчитана с использованием Ливерморских таблиц OPAL [11]. Наглядно виден эффект увеличения непрозрачностей от CS70+CT76 к LAOL и далее к OPAL в лучистой зоне. Кроме того, подтверждается характер перемещения модели по плоскости при изменении ядра: модели 6, 21, 22 имеют разный возраст и, следовательно, разный профиль X: они расположены параллельно прямой I'. Ситуация с моделями 7,27,28, имеющими разные непрозрачности в ядре и параллельными I", аналогична.

Слева внизу кружком с точкой в центре нанесены полученные гелиосейсмологическими методами значения параметров конвективной зоны (показаны также оценки погрешности определения) [12] (вычисление энтропии было выполнено авторами для оптимальной модели из [12]). Как видим, для приведения стандартной модели с непрозрачностями OPAL SSM к этим значениям Y и S_{cnv} требуется а) небольшое уменьшение непрозрачности в лучистой зоне; б) значительное уменьшение непрозрачности и/или содержания водорода в ядре. Оценки показывают, что вторая модификация должна быть весьма значительна (15% в X или 30—40% в непрозрачности), поэтому возможность согласования стандартной модели с результатами гелиосейсмологии представляется пока проблематичной. Впрочем, такие оценки должны рассматриваться, конечно, как предварительные.

Литература

1. Cox J.P., Giuli R.J. // Principles of Stellar Structure. New York, Gordon and Breach, 1968.
2. Christensen-Dalsgaard J. // Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics. 1992, V. **62**, P. 123–152.
3. Courtaud D., Damamme G., Genot E. et al. // Solar Phys. 1990, V. **128**, P. 49–60.
4. Dziembowski W. A., Pamyatnykh A. A., Sienkiewicz R., // Acta Astron. 1992, V. **42**, P. 5–15.
5. Faulkner J., Swenson F.J. // Astrophys. J. 1992, V. **386**, P. L55–L58.
6. Guzik J.A., Cox A.N. // Astrophys. J. 1992, V. **386**, P. 729–733.
7. Kim Y.-C., Demarque P., Guenther D.B. // Astrophys. J. 1991, V. **377**, P. 407–412.
8. Cox A.N., Stewart J.N. // Astrophys. J. Suppl. 1970, V. **19**, P. 243.
9. Cox A. N., Tabor J. E. // Astrophys. J. Suppl. 1976, V. **31**, P. 271–312.
10. Huebner W. F., Merts A. L., Magee N. H., Argo M. F. Report LA-6760-M. Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, 1977.
11. Iglesias C. A., Rogers F. J. // Astrophys. J. 1991. V. **371**, P. 408–417.
12. Vorontsov S. V., Baturin V. A., Pamyatnykh A.A. // Nature, 1991. V. **349**, P. 49.