СТАНДАРТНЫЕ МОДЕЛИ СОЛНЦА С РАЗНЫМИ ТАБЛИЦАМИ НЕПРОЗРАЧНОСТЕЙ

Standard Solar Models Using Different Opacity Tables

Abstract. Standard solar models with five different opacity tables are computed. Replacing the Los Alamos opacities with the Livermore ones results in the increase of the convection zone depth by $0.015R_\odot$ and surface helium abumdance (by mass) by 1.5% up to approximately 28% (Grevesse mixture).

Известно, что одним из важнейших факторов, определяющих внутреннее строение Солнца, является коэффициент поглощения плазмы (непрозрачность κ). Расчет ее весьма сложен, т.к. он должен принимать во внимание огромное количество процессов поглощения и испускания при сложном химическом составе вещества. В связи с появлением новых таблиц сделана попытка обобщить накопленные за 13 лет результаты по приложению этих расчетов к моделированию Солнца. Рассчитано 5 стандартных моделей Солнца (ССМ) с разными таблицами непрозрачностей (см. табл. 1). Остальные физические данные (кроме непрозрачностей) одинаковы для всех моделей: уравнение состояния MHD (D.G.Hummer, D.Mihalas 1988, Ap. J. **331**, 794), сечения ядерных реакций по (G.R.Caughlan, W.A.Fowler 1988, Atomic Data and Nucl. Data Tabl., **40**, 284).

На рис. 1 представлено сравнение таблиц непрозрачностей. Так как таблицы, вообще говоря, трехмерны (температура T, плотность ρ и один параметр химического состава, обычно содержание водорода X), то приведены лишь значения вдоль профиля (T, ρ, X) из модели M–IR91. Температуры ограничены снизу 2 млн. K, т.к. при более низких температурах в модели лежит конвективная зона, в которой сами значения κ роли не играют вследствие того, что доля лучистого переноса энергии там ничтожна. Отметим, что профили (T, ρ, X) в разных моделях достаточно близки, так что использование "собственного" профиля для каждой модели изменяет график незначительно. Как видим, общая тенденция состоит в увеличении значений непрозрачности с усовершенствованием методов ее расчета. Интересно, что

Модель	Непр.	Y	α	H_{bcz}	T_c, 10^6K	ρ_c, г/см^3	F_{Cl}	F_{Ga}
M–FRM	FRM	0.2494	1.4840	0.2681	15.01	161.5	4.2	109
M–CS70	CS70	0.2320	4.6248	0.2698	15.05	149.4	4.0	107
M–BU88	BU88	0.2662	1.6509	0.2753	15.58	149.4	7.2	121
M–WKM	WKM	0.2802	1.9645	0.2631	15.62	149.6	8.0	126
M–IR91	IR91	0.2803	1.6289	0.2810	15.72	150.8	8.5	127

Таблица 1. Стандартные модели Солнца. Y – содержание гелия на поверхности (по массе), α – параметр теории конвекции, H_{bcz} – глубина конвективной зоны (в долях радиуса Солнца), T_c и ρ_c – центральные значения температуры и плотности, F_{Cl} и F_{Ga} – нейтринные потоки на Земле, в SNU, для галлиевого и хлорного детекторов соответственно. Обозначения таблиц непрозрачностей: FRM – аналитическая аппроксимационная формула из J.Christensen–Dalsgaard 1988, "Computational Procedures for GONG Solar Model Project" (preprint); CS70 – A. N. Cox, J. N. Stewart 1970, Ap. J. Supp. **19**, 243; BU88 – J.N.Bahcall, R.K.Ulrich 1988, Rev. Mod. Phys. **60**, 297; WKM – A.Weiss, J.J.Keady, N.H.Magee, Jr. 1990, Atomic Data and Nuclear Data Tabl. **45**, 209; IR91 – C.A.Iglesias, F.J.Rogers 1991, Ap. J., **371**, 408.

таблицы WKM и IR91 имеют близкие значения в энерговыделяющем ядре (в атмосфере и верхней части конвективной зоны они также имеют одинаковые непрозрачности — там таблицы WKM и IR91 дополнены таблицами A.N.Cox, J.E.Tabor 1976, Ap. J. Suppl. **31**, 271). Соответствующие модели имеют практически равные содержания гелия. Это означает, что по крайней мере возможно изменить непрозрачности в лучистой зоне, не затрагивая Y.

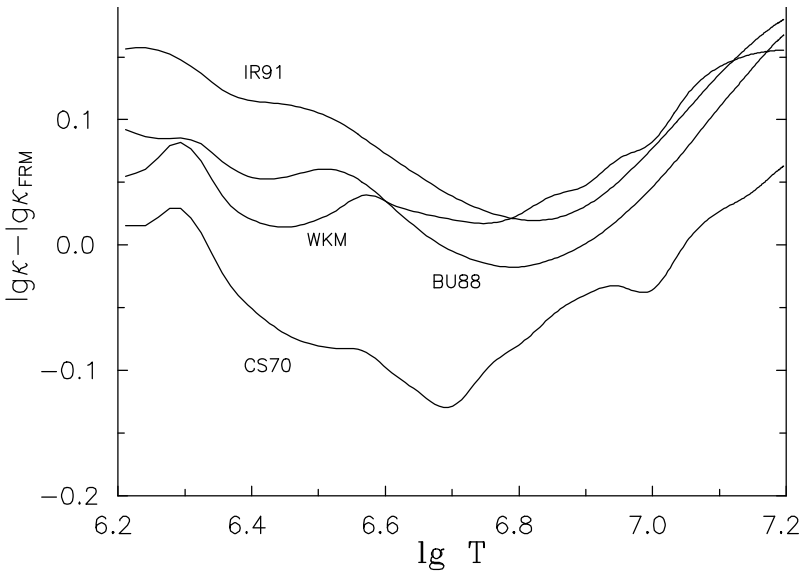

Рисунок 1. Непрозрачности в ядре и лучистой зоне ССМ. По оси ординат — разность десятичных логарифмов непрозрачности, рассчитанная в точках по температуре, плотности, хим. составу из модели M — IR91. Из логарифмов непрозрачностей 4 — х таблиц вычтен логарифм к, рассчитанный по таблицам FRM.

Цифры нейтринных потоков (табл. 1) не содержат неожиданностей. Малые потоки у моделей M — FRM и M — CS70 обусловлены более низкими температурами в центре, что является следствием меньших непрозрачностей в центральных областях. Вообще связь между T_c и потоком хлорных нейтрино весьма отчетлива. Также хорошо видно, что ожидаемый поток для галлиевого детектора слабо зависит от строения модели.

Из приведенных моделей только две имеют одинаковые относительные содержания тяжелых элементов — M — BU88 и M — IR91 (смесь по N. Grevesse 1984, Phys. Scripta, **T8**, 49). Согласно их параметрам, переход от таблиц Лос — Аламосской лаборатории (LAOL; примерами являются WKM и BU88) к таблицам Ливерморской лаборатории (OPAL; пример — IR91) приводит к увеличению содержания гелия примерно на 0.015 и росту глубины конвективной зоны на $0.006R_\odot$. Последняя оценка должна быть скорректирована в большую сторону примерно на 0.01, т.к. таблицы BU88 не полностью охватывают необходимый интервал температур/плотностей и требуют экстраполяции; согласно (J.Faulkner, F.J.Swenson 1992, Ap.J. **386**, L55) она вызывает приведенную выше ошибку. В модели M — IR91 удалось избежать экстраполяции благодаря использованию дополнительных данных из работы Faulkner & Swenson.

Итак, общая тенденция состоит в росте теоретических значений непрозрачностей и соответственно содержания гелия; всего же за 11 лет (1970 — 1991) непрозрачности в ядре/лучистой зоне солнечной модели возросли приблизительно на 30 — 50%, содержание гелия увеличилось на 0.05 (с 0.23 до 0.28).

Гос. Астрономический институт
им. П. К .Штернберга

С. В. Аюков
S. V. Ajukov

Поступила 07 февраля 1994 г.