

Анализ проблемы солнечного состава в контексте расширений Стандартной модели физики частиц

Антон Соколов

научный руководитель: д. ф.-м. н. чл.-к. РАН С.В.Троицкий

Московский Государственный Университет

им. М. В. Ломоносова

Физический факультет

24 мая 2019

Стандартная солнечная модель

ВХОД: τ_{\odot} , M_{\odot} , L_{\odot} , R_{\odot} , $(Z/X)_{\odot}$, $\kappa(\rho, T, X_i)$, $\epsilon(\rho, T, X_i)$

ФИТ: Y_{ini} , Z_{ini} , α_{MLT}

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP}{dr} = -\frac{GM\rho}{r^2}, \\ \frac{dM}{dr} = 4\pi r^2 \rho, \\ \frac{dL}{dr} = 4\pi r^2 \rho (\epsilon_{\text{nuc}} - \epsilon_{\nu}), \\ \frac{dT}{dr} = \begin{cases} -\frac{3\kappa\rho L}{64\pi r^2 \sigma T^3}, & \nabla_{\text{rad}} < \nabla_{\text{ad}} \\ \nabla_{\text{ad}} \cdot \frac{T}{P} \frac{dP}{dr}, & \nabla_{\text{rad}} \geq \nabla_{\text{ad}} \end{cases} \\ P = \frac{\rho T}{\mu m_{\text{H}}} \end{array} \right. \begin{array}{l} \triangleright \text{гидростатика} \\ \triangleright \text{непрерывность} \\ \triangleright \text{источники энергии} \\ \triangleright \text{перенос энергии} \\ \triangleright \text{уравнение состояния} \end{array}$$

ВЫХОД: $T(r)$, $P(r)$, $\rho(r)$, $M(r)$, $L(r)$, $X_i(r)$, $\Phi_{\nu,i}$

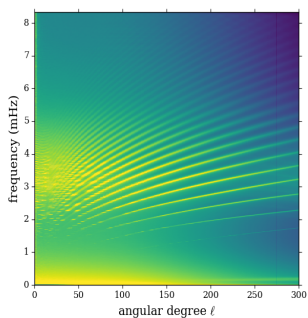
Физика Солнца в XXI веке

Физика Солнца – быстро развивающаяся область:

- Солнечные нейтрино
- Неравновесные 3D модели атмосферы → химсостав AGSS09
- Функция непрозрачности: расчёты и эксперимент
- Гелиосейсмология: новые данные

Гелиосейсмология

Спектр колебаний Солнца позволяет определить:

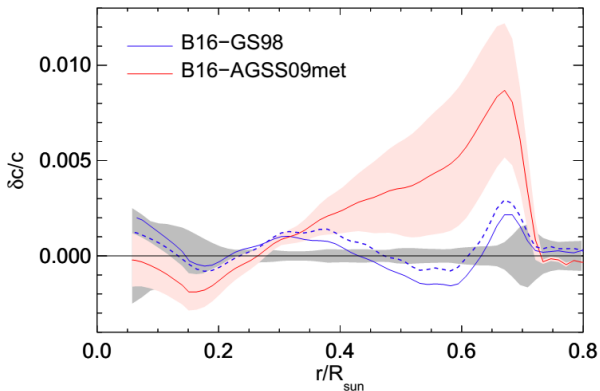


- профиль скорости звука
- содержание гелия на поверхности
- глубину конвективной зоны
- профиль плотности
- дифференциальное вращение

NB! $L/M^3 \sim \mu^4/\kappa$

Проблема солнечного состава

Гелиосейсмологический профиль скорости звука не соответствует вычислениям в Стандартной солнечной модели:



Недиффузионный теплообмен

Излучение частиц и поглощение энергии \rightarrow изменение $\epsilon(m)$.

$$I(m) = \xi_1 \int_0^m \left(\epsilon_{\text{nuc}}(\bar{m}) - \epsilon_{\nu}(\bar{m}) + \sum_i \epsilon_i(\bar{m}) \right) d\bar{m}, \quad I(1) = 1$$

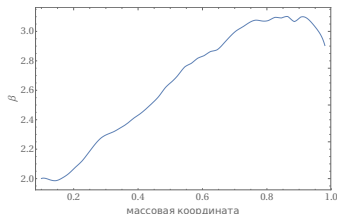
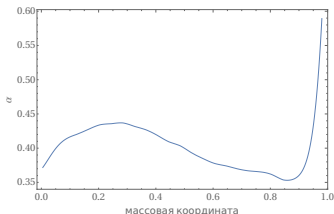
$$\sum_i \epsilon_i = \sum_i \tilde{\epsilon}_i + \bar{\epsilon}, \quad \bar{\epsilon} \equiv \int_0^1 dm \sum_i \epsilon_i$$

Эффекты:

- $\sum_i \tilde{\epsilon}_i \rightarrow$ изменение формы $I(m)$
- $\bar{\epsilon} \rightarrow$ изменение скорости горения $\epsilon_{\text{nuc}} - \epsilon_{\nu}$

Две модели: часть I

- переход к массовой координате
- $p' \propto -m/r^4$, $t' \propto -\kappa l/(r^4 t^3) \implies l \propto m t^3 t' / (\kappa p')$
- $\kappa \propto \rho^\alpha t^{-\beta}$, таблицы OPAL, состав AGSS09



- две модели: Стандартная и «исправленная»

$$\delta\rho/\rho, \delta c_s/c_s, \delta\mu/\mu, \delta t/t, \delta r/r, \delta p'/p' \ll 1$$

$$\frac{\delta l}{l} = 2 \cdot (3 + \beta) \frac{\delta c_s}{c_s} - (\alpha + 1) \frac{\delta \rho}{\rho} + (4 + \beta) \frac{\delta \mu}{\mu} + \frac{c_s}{c'_s} \left[\left(\frac{\delta c_s}{c_s} \right)' + \frac{1}{2} \left(\frac{\delta \mu}{\mu} \right)' \right] - \left[\frac{p}{p'} \left(\frac{\delta \rho}{\rho} \right)' + 2 \frac{p}{p'} \left(\frac{\delta c_s}{c_s} \right)' \right]$$

Две модели: часть II

- две модели: Стандартная и с увеличенной непрозрачностью (Villante 2015)
- изменение $l(m)$ теперь только в ядре: $\bar{\delta}l(m) = \bar{\delta}l_{\text{яд}}(m)$,
 $\bar{\delta}l_{\text{яд}}/l_{\text{яд}} \ll 1$
- $\kappa \propto mt^3 t'/(lp')$ \implies

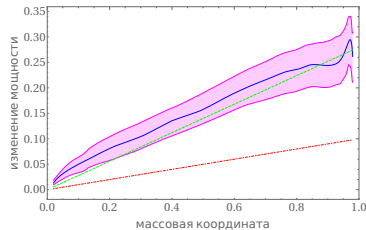
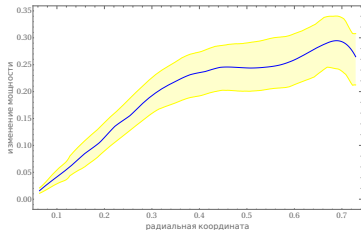
$$\frac{\bar{\delta}\kappa}{\kappa} = 3 \frac{\bar{\delta}t}{t} + \frac{\bar{\delta}t'}{t'} - \frac{\bar{\delta}p'}{p'} - \left(\frac{\bar{\delta}l}{l} \right)_{\text{яд}}$$

- гелиосейсмология: $\delta c_s = \bar{\delta}c_s$ и $\delta\rho = \bar{\delta}\rho \implies \delta p' = \bar{\delta}p'$,
а также

$$\frac{\delta\mu}{\mu} = \frac{\bar{\delta}\mu}{\mu} + \left(\frac{\delta\mu}{\mu} \right)_{\text{яд}}, \quad \frac{\bar{\delta}\mu}{\mu} = \frac{5\delta Y_{\text{пов}}}{8-5Y}$$

Профиль мощности светового потока

$$\begin{aligned}
 (\delta I)_{\bar{\epsilon}} = I \cdot & \left(\frac{\bar{\delta}\kappa}{\kappa} + 2\beta \frac{\delta c_s}{c_s} - \alpha \frac{\delta\rho}{\rho} + \beta \frac{\bar{\delta}\mu}{\mu} + (4 + \beta) \cdot \left(\frac{\delta\mu}{\mu} \right)_{\text{яд}} + \right. \\
 & \left. \frac{c_s}{2c'_s} \left(\frac{\delta\mu}{\mu} \right)'_{\text{яд}} + \left(\frac{\delta I - \bar{\delta}I}{I} \right)_{\text{яд}} \right)
 \end{aligned}$$



Модель

Рассмотрим векторное расширение СМ с кинетическим и массовым смешиваниями:

$$L_0 = -\frac{1}{4}F_{1\mu\nu}F_1^{\mu\nu} - \frac{1}{4}F_{2\mu\nu}F_2^{\mu\nu} - \frac{\delta}{2}F_{1\mu\nu}F_2^{\mu\nu},$$

$$L_1 = J'_\mu A_1^\mu + J_\mu A_2^\mu,$$

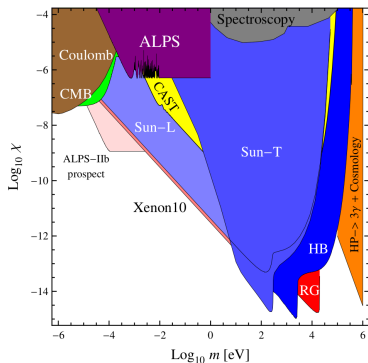
$$L_{Mass} = -\frac{1}{2}M_1^2 A_{1\mu}A_1^\mu - \frac{1}{2}M_2^2 A_{2\mu}A_2^\mu - M_1 M_2 A_{1\mu}A_2^\mu.$$

После диагонализации получим взаимодействие:

$$L_1 = \frac{1}{\sqrt{1-2\delta\epsilon+\epsilon^2}} \left(\frac{\epsilon-\delta}{\sqrt{1-\delta^2}} J_\mu + \frac{1-\epsilon\delta}{\sqrt{1-\delta^2}} J'_\mu \right) A_M^\mu + \frac{1}{\sqrt{1-2\delta\epsilon+\epsilon^2}} (J_\mu - \epsilon J'_\mu) A_\gamma^\mu.$$

Рождение скрытых фотонов

граница зоны лучистого переноса $\rightarrow M = 12$ эВ



■ излучает сфера

■ мощность:

$$I_{\gamma'} = 0.26 \cdot \left(\frac{\delta}{1.5 \cdot 10^{-13}} \right)^2$$

$M \gg m_c \rightarrow$ мгновенный распад на миллизаряды

Захват магнитным полем

- захват при $\omega_c \sim \text{кэВ}$:

$$r_L = \frac{\sqrt{\omega_c^2 - m_c^2}}{\epsilon e' B} = 0.01 \left(\frac{\omega_c}{\text{кэВ}} \right) \left(\frac{B}{7 \text{ МГц}} \right)^{-1} \left(\frac{\epsilon}{2 \cdot 10^{-14}} \right)^{-1} \left(\frac{\alpha'}{10^{-3} \alpha} \right)^{-1/2}$$

- закон Ферраро и гелиосейсмология \rightarrow конфайнмент поля
- ограничение на α' :

$$M_{th} = \frac{\omega'_{pl}}{\sqrt{\gamma_c}} = \sqrt{\frac{4\pi\alpha' \cdot 2n_c}{\gamma_c m_c}} \simeq \sqrt{1.5\alpha'} T_c, \quad M_{th} \ll M \Rightarrow \alpha' \ll 0.7 \left(\frac{M}{T_c} \right)^2$$

$$\alpha' \ll 10^{-4} \left(\frac{T_c}{\text{кэВ}} \right)^{-2}$$

Подогрев солнечной плазмы

- миллиарды + электроны через СФ: $\sigma \sim \alpha \alpha' \delta^2$
- передача энергии: $\Delta\omega_c = \frac{\omega_c}{m_e} \cdot (\xi T - \omega_c) \cdot (1 - \cos\theta)$
- сечение:

$$d\sigma = \frac{\delta^2 e^2 e'^2}{8\pi\omega_c^2} \cdot \frac{(1 - x/2) dx}{(x + \psi)^2}, \quad x = 1 - \cos\theta, \quad \psi = M^2/(2\omega_c^2)$$

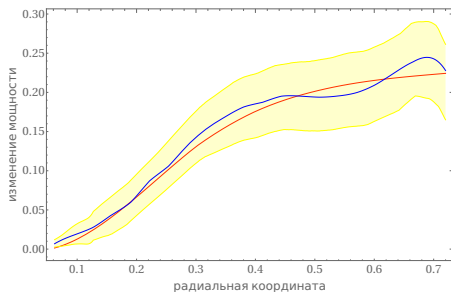
- подогрев:

$$Q = 2n_e n_c \left\langle \int \Delta\omega_c d\sigma \right\rangle = \frac{\delta^2 e^2 e'^2 n_e n_c}{4\pi m_e} \cdot \left(\frac{T}{T_c} - 1 \right) \cdot K \left(\frac{4T_c^2}{M^2} \right)$$

$$K(a) \equiv \frac{2}{3\zeta(3)} \int_0^\infty dx \frac{x^2 (\ln ax^2 - 1)}{e^x + 1}$$

Изменение мощности светового потока

$$\delta I_c(r) = -\frac{4\pi R_{\odot}^3}{L_{\odot}} \cdot \int_0^r Q(x) x^2 dx$$



$$T_c = 4 \text{ кэВ}, \quad \alpha' = 6.5 \cdot 10^{-7}, \quad C = -0.05$$

Спасибо за внимание!

Перемасштабирование непрозрачности

Аналогия с решением через тёмную материю: $C = -0.26$

