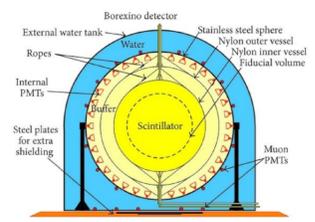
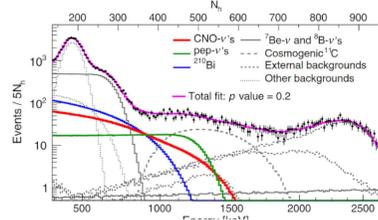


Оценка влияния калия 40 на конвекцию мантии Земли с учетом анализа данных Borexino.



- Глубина 4200 метров водного эквивалента.
- Объем жидкого сцинтиллятора 315 м³
- Обнаружены единичные события от нейтрино и антинейтрино. В основном от Солнца.
- В связи с фоновой радиоактивности изоляцией, чувствительный объем был уменьшен до 73 т.

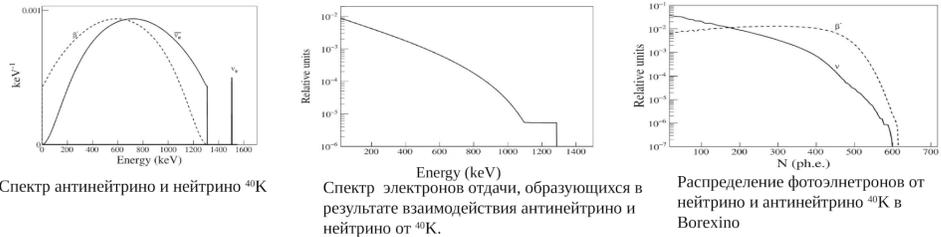
Сессия-конференция СЯФ ОФН РАН
«Физика фундаментальных взаимодействий»
Карпиков Иван
Институт ядерных исследований РАН



Результаты измерений Borexino за 2022 год.
Темп счета солнечных нейтрино CNO цикла:
 $R_{CNO} = 6.7 \text{ events per d/100 tons}$
Но геонейтрино от ⁴⁰K может оказать влияние на измерения CNO нейтрино.

Мотивация

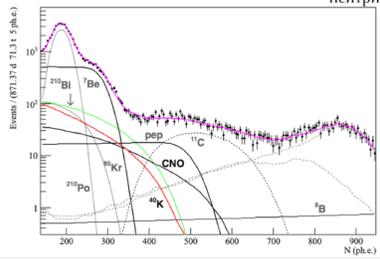
Какую долю калия в земной коре допускает Borexino?



Спектр антинейтрино и нейтрино ⁴⁰K

Спектр электронов отдачи, образующихся в результате взаимодействия антинейтрино и нейтрино от ⁴⁰K.

Распределение фотоэлектронов от нейтрино и антинейтрино ⁴⁰K в Borexino



Слева показан спектр фотоэлектронов одиночных событий детектора Borexino. Черные точки с ошибками – экспериментальные данные. Кривые – вклады различных источников событий и их сумма, полученные в результате подгонки к экспериментальным данным для $\chi^2 = 175.8$. Красная кривая – вклад от ⁴⁰K-geo-v событий. Площадь под этой кривой (от нуля фотоэлектронов) равна $R(^{40}\text{K-geo-v}) = 11 \text{ cpd}/100\text{t}$, что допускает долю калия от массы Земли в 3.4%. Результат подгонки к данным без вклада ⁴⁰K значительно хуже и даёт $\chi^2 = 199.5$

L. B. Bezrukov and V. V. Sinev, Phys. Atomic Nuc. 87, 6, 711 (2024)

Оценка теплового потока от ⁴⁰K

По обще принятым оценкам калий составляет примерно 2,6% от массы земной коры.

Высокая скорость счета ⁴⁰K-geo-v в данных Borexino указывает на высокую распространенность калия по всей Земле.

С учетом изотопного состава 0,0117%, общее количество калия в Земле составляет 3,2%.

$$m(^{40}\text{K}) = 2.1 \cdot 10^{22} \text{ g}$$

$$N = (m(^{40}\text{K}) \cdot N_a \cdot E_{\text{release}} \cdot \alpha) / (A \cdot \tau)$$

где N_a — число Авогадро, A — атомный номер, $E_{\text{release}} = 0.6 \text{ МэВ}$ — средняя энергия, выделяемая при распаде при ⁴⁰K, $\tau = t_{1/2} / \ln 2$ — среднее время жизни изотопа, α — коэффициент преобразования 1 МэВ = $1.6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$

Такое количество ⁴⁰K приводит к суммарному тепловому потоку около 600 ТВт!

При этом общий тепловой поток Земли составляет 47 ТВт.

Возникает вопрос: как повышенное содержание радиоактивного калия влияет на тепловой баланс Земли?

Приближение Буссинеска

Безразмерные уравнения тепловой конвекции

Для описания потоков в верхней мантии Земли мы решили систему безразмерных уравнений сохранения массы импульса и энергии в двумерной геометрии сферического кольца в приближении Буссинеска.

$$-\nabla P + \nabla \cdot [\eta(\nabla \mathbf{V} + (\nabla \mathbf{V})^T)] = Ra T e_r$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) T = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + H(t)$$

где \mathbf{V} — вектор скорости; P — динамическое давление; T — температура; t — время; η — коэффициент динамической вязкости; κ — коэффициент тепловой диффузии; $H(t)$ — внутренний источник тепла. Ra — число Рэлея, определяемое как:

$$Ra = \frac{\alpha \cdot \rho_0 \cdot g \cdot \delta T \cdot D^3}{\eta_0 \cdot \kappa_0}$$

где α — коэффициент теплового расширения; g — ускорение свободного падения; δT — разница температур между нижней границей мантии и верхней; ρ_0 — плотность при нормальных условиях; η_0 — вязкость при нормальных условиях; κ_0 — коэффициент тепловой диффузии; D — толщина мантии.

Начальные и граничные условия

Параметры моделирования

- $\alpha_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
- $\rho = 4.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
- $D = 2900 \text{ km}$
- $\Delta T = 3700 \text{ K}$
- $\eta_0 = 5 \times 10^{21} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
- $\kappa = 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
- $c_p = 1.25 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg K})$
- $Ra = 10^5$ и $Ra = 10^6$

Источники тепла от ⁴⁰K внутри мантии

$$H(t) = H_0 \cdot \exp(-t/t_{40K})$$

Отсутствие протекания
 $\mathbf{V}|_{r=0} = \mathbf{V}|_{r=D} = 0$

Температура на границе мантии и земной коры
 $T|_{r=0} = 0.12 \Delta T = 420 \text{ K}^0$

Температура на границе мантии и ядра
 $T|_{r=D} = 1.12 \Delta T = 3920 \text{ K}^0$

Начальные условия
 $\mathbf{V} = 0$
 $T = \Delta T = 3500 \text{ K}^0$

$t_{max} = 4500 \text{ Myr}$

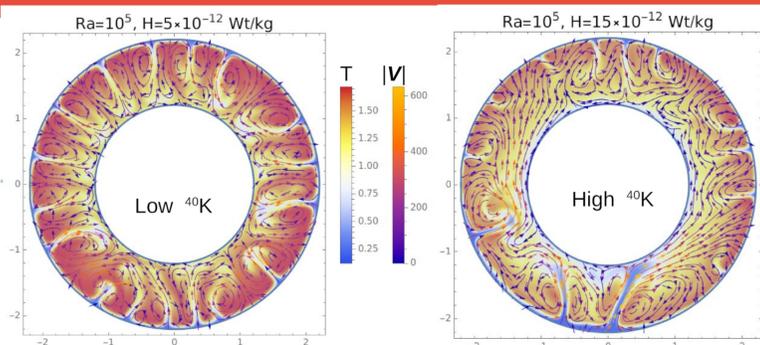
где $H_0 = H_{now} \cdot \exp(t_{max}/t_{40K})$

Мы рассматриваем две модели с источником тепла от ⁴⁰K:

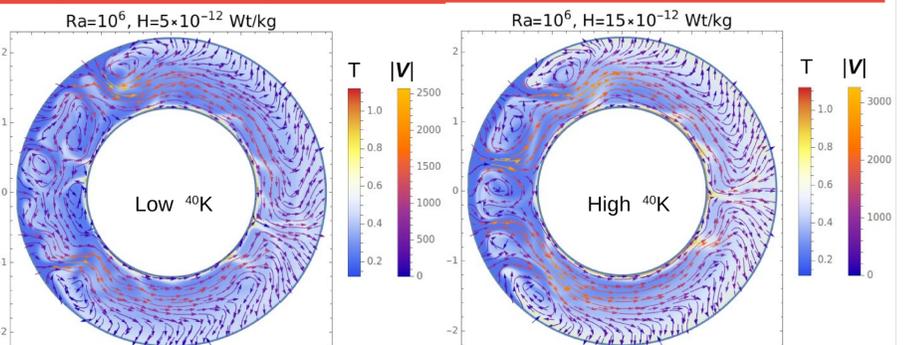
- Низкое содержание ⁴⁰K: $H_{now} = 5 \times 10^{-12} \text{ W/kg}$ 20 TW
- Высокое содержание ⁴⁰K: $H_{now} = 15 \times 10^{-12} \text{ W/kg}$ 60 TW

Систему уравнений в частных производных решили методом конечных элементов в пакете Wolfram Mathematica

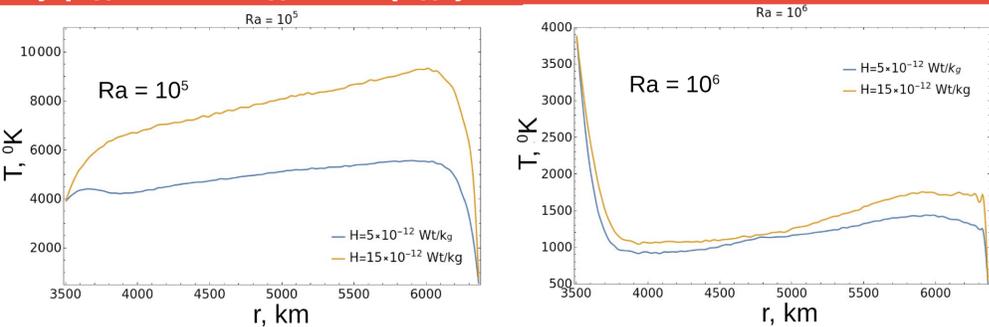
Результаты моделирования конвекции в мантии для $Ra = 10^5$



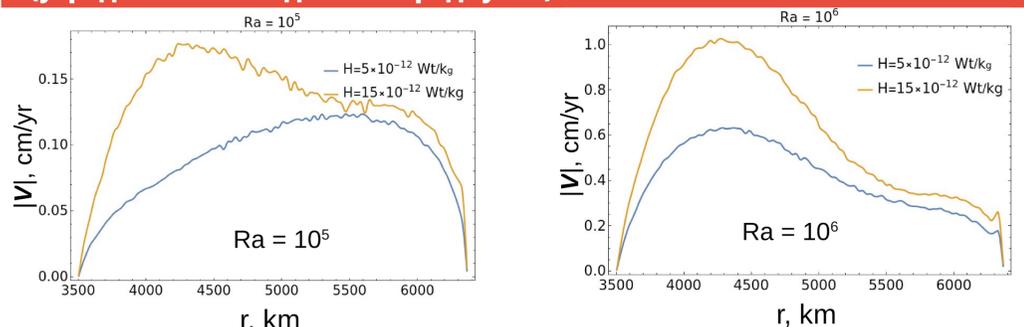
Результаты моделирования конвекции в мантии для $Ra = 10^6$



Зависимость средней температуры от расстояния от центра Земли. (усреднение в каждом слое радиуса r)



Зависимость модуля средней скорости от расстояния до центра Земли. (усреднение в каждом слое радиуса r)



Обсуждение и заключение

Из результатов анализа данных Borexino следует, что на Земле имеется большое содержание ⁴⁰K. В нашей работе мы продемонстрировали, насколько реалистичен этот результат, и насколько он согласуется с моделями структуры Земли. В нашей работе мы качественно показали, что при определенных параметрах мантии, таких как вязкость, возможно высокое содержание калия в мантии Земли. Действительно, мы показали, что при высоких числах Рэлея охлаждение Земли происходит гораздо быстрее. Результаты анализа данных Borexino могут помочь лучше понять и прояснить структуру Земли, поэтому очень важно, чтобы подобные эксперименты проводились в будущем.

В будущем мы планируем продолжить разработку численной модели конвекции земной мантии с учетом тепла от калия-40. В наши планы входит моделирование зависимости вязкости и теплопроводности от температуры и статического давления.

