



ЗАХВАТ ТЁМНЫХ АТОМОВ НЕБЕСНЫМИ ТЕЛАМИ

Студент:

А.М. Халилова, б23-102

Научный руководитель:

М.Ю. Хлопов, д.ф.-м.н., проф. каф. №40

ВВЕДЕНИЕ И АКТУАЛЬНОСТЬ



Многолетние поиски слабо взаимодействующих частиц WIMP не дали результата, поэтому развиваются альтернативные сценарии. Один из них — модель тёмных атомов: связанных состояний многозарядной частицы с ядрами гелия: $X(\text{He})_n$, который недавно был предложен в рамках несуперсимметричного подхода, исходящего из композитной природы бозона Хиггса.



Цель и задачи

Цель: теоретическое моделирование захвата тёмных атомов, оценка теплового потока от их термализации и реакций синтеза, а также нахождение распределения тёмных атомов внутри небесных тел.

Задачи:



1. Описать модель тёмных атомов и ограничения на их параметры из экспериментальных данных;
2. Оценить **глубину термализации** тёмных атомов в небесном теле;
3. Получить аналитические выражения для нахождения энергосвечения за счёт **реакций синтеза** тёмных атомов с ядрами обычного вещества;
4. Построить **уравнение теплопроводности** с двумя источниками нагрева — термализацией и реакциями синтеза;
5. Получить **распределение концентрации** тёмных атомов внутри объекта с учётом диффузии, гравитации и стока на реакциях;
6. Решить уравнение диффузии для астероида Ида.

МОДЕЛЬ И ОГРАНИЧЕНИЯ

Тёмные атомы - это гипотетические составные частицы скрытой массы — связанные состояния многозарядной частицы X^{-2n} с ядрами гелия: $X(\text{He})_n$. В отличие от традиционных WIMP, тёмные атомы обладают ядерным взаимодействием с обычным веществом.

Параметры:

- Масса: $2 \text{ ТэВ} < m_X < 10 \text{ ТэВ}$
- Плотность в галактическом гало: $\rho_{\chi 0} \sim 10^{-24} \text{ г/см}^3$
- Скорость относительно небесных тел: $v_{\chi 0} \approx 2,3 \cdot 10^7 \text{ см/с}$

Допустимые концентрации аномальных изотопов:

Элемент	$n_N^{\text{аном}}/n_N$		
	1 ТэВ	5 ТэВ	10 ТэВ
H	$3 \cdot 10^{-23}$	$2 \cdot 10^{-21}$	$6 \cdot 10^{-20}$
He	$\sim 10^{-19}$ (Земля); $\sim 10^{-16}$ (Солнечная система)		
Li	$6 \cdot 10^{-13}$	$9 \cdot 10^{-11}$	$7 \cdot 10^{-10}$
Be	$1 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$7 \cdot 10^{-9}$
B	$6 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-11}$	$8 \cdot 10^{-11}$
C	$8 \cdot 10^{-20}$	$3 \cdot 10^{-17}$	$2 \cdot 10^{-16}$
O	$4 \cdot 10^{-17}$	$4 \cdot 10^{-15}$	$3 \cdot 10^{-14}$
F	$4 \cdot 10^{-15}$	$3 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{-12}$
Na	$5 \cdot 10^{-12}$		

ЗАХВАТ И ТЕРМАЛИЗАЦИЯ

- Поток тёмных атомов: $j_x = \rho_{\chi 0} \cdot v_{\chi 0} = 2.3 \cdot 10^{-17} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
- Полная мощность энерговыделения: $\frac{dE_k}{dt} = \pi G M R \rho_{\chi 0} v_{\chi 0} f$
- Средние потери энергии за одно столкновение: $\langle \Delta E \rangle = \frac{2m_{\chi} m_{\text{SM}}}{(m_{\chi} + m_{\text{SM}})^2} E$
- Глубина термализации: $\delta R = \frac{1}{n_{\text{SM}} \sigma} \sqrt{\frac{(m_{\chi} + m_{\text{SM}})^2}{6m_{\chi} m_{\text{SM}}} \ln \frac{E_0}{k_B T}}$

G – гравитационная постоянная, M и R – масса и радиус небесного тела, f – доля захваченных частиц, E – энергия частицы до столкновения, E_0 – энергия частицы при налетании на небесное тело, n_{SM} – концентрация ядер обычного вещества, σ – сечение рассеяния тёмного атома с ядром, m_{SM} – масса обычного ядра, с которым происходит взаимодействие, k_B – постоянная Больцмана.

При параметрах, характерных для земной коры (концентрация обычного вещества – $6 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$, температура 270 К), и при массе тёмного атома 2 ТэВ: $\delta R \approx 60 \text{ м}$.

РЕАКЦИИ С ОБЫЧНЫМИ ЯДРАМИ

Мощность энерговыделения: $q_{fus} = Q_{fus} n_{\chi} n_{SM} \langle \sigma v \rangle$

(Q_{fus} - энерговыделение одной реакции, может быть найдено как разность масс продуктов реакции и исходных ядер, n_{χ} - концентрация тёмных атомов в некотором объёме, $\langle \sigma v \rangle$ - произведения сечения взаимодействия на относительную скорость тёмного атома и ядра)

Характерное время реакции при $n_{SM} \sim 10^{23} \text{ см}^{-3}$, $\sigma \sim 10^{-35} \text{ см}^2$ и $v \sim 10^5 \text{ см/с}$: $\tau \sim 10^7 \text{ с}$ (около года).

УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{dE_k/dt}{4\pi R^2 \delta R} \cdot \Theta(r - (R - \delta R)) + Q_{fus} n_{\chi} n_{SM} \langle \sigma v \rangle$$

Граничные условия:

$$-k(r) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \sigma_{SB} T(R, t)^4 \qquad \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0$$

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЁМНЫХ АТОМОВ

Уравнение непрерывности:

$$-4\pi r^2 n_\chi v_{diff} = 4\pi R^2 \Phi - \int_r^R n_\chi(r') n_{SM}(r') \langle \sigma v \rangle \cdot 4\pi r'^2 dr' \quad (v_{diff} - \text{скорость диффузии})$$

Уравнение диффузии:

$$\frac{1}{n_\chi} \cdot \frac{dn_\chi}{dr} + \frac{1}{T} \cdot \frac{dT}{dr} + \frac{m_\chi g}{k_B T} - \frac{R^2 \Phi}{D_{\chi N} n_\chi r^2} + \frac{1}{D_{\chi N} n_\chi} \cdot \int_r^R \frac{r'^2}{r^2} \cdot n_\chi n_{SM} \langle \sigma v \rangle dr' = 0$$

Граничное условие: $\left. \frac{dn_\chi}{dr} \right|_{r=0} = 0$

(здесь $\Phi = v_{\chi 0} \sqrt{\frac{8}{3\pi} \frac{\rho_{\chi 0}}{m_\chi}}$)

ПРИМЕНЕНИЕ К КОНКРЕТНЫМ НЕБЕСНЫМ ТЕЛАМ

Астероид Ида

Данные миссии Galileo:

- Диаметр 31 км
- Плотность 2,7 г/см³
- Температура поверхности 155 К
- Температура в центре — 280 К
- Состав: кислород (40%), железо (22%), кремний (18%), магний (15%)



Тёмные атомы накапливаются в узком приповерхностном слое, а их концентрация резко падает с глубиной.

Планета 9

– гипотетическое тело за поясом Койпера, существование которого предполагается для объяснения аномальной кластеризации орбит некоторых транснептуновых объектов.

Предполагаемые параметры:

- Масса: 5–10 M_{\oplus}
- Радиус: 2–4 R_{\oplus}
- Расстояние от Солнца: 400-800 а.е.
- Температура от солнечного нагрева: 10-15 К

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Оценена глубина термализации тёмных атомов – 60 м;
- Построено уравнение теплопроводности с учётом как термализации тёмных атомов, так и энергии, высвобождающейся при реакциях слияния с обычными ядрами;
- Получено уравнение диффузии тёмных атомов с учётом гравитации, градиента температуры и стока на реакциях;
- Уравнение диффузии решено для астероида Ида;
- Проведено обсуждение перспектив использования модели для поиска гипотетической Планеты 9 в инфракрасном диапазоне;
- Данная модель может быть применена для нахождения распределения тёмных атомов и теплового баланса в другим небесных телах.