

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ СВЯЗАННЫХ СОСТОЯНИЙ ТЕМНЫХ АТОМОВ В РАННЕЙ ВСЕЛЕННОЙ

Полянский Денис Евгеньевич

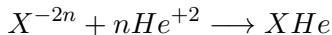
НИЯУ «МИФИ»

Научный руководитель д.ф. - м.н., проф. М. Ю. Хлопов

Отчет о научно-исследовательской работе
Москва, 6 мая 2025 г.

Введение

В данной работе мы рассматриваем сценарий составной скрытой массы с участием гипотетически стабильных частиц X с зарядом $-2n$.



при $T \approx 100$ кэВ.

Согласно ускорителю LHC, нижнее ограничение на массу частицы X : $m_X \approx 1$ ТэВ.

Структура данного состояния зависит от параметра [1]

$a = \alpha Z_x Z_\alpha A m_p R$, где α - постоянная тонкой структуры, Z_x, Z_α - зарядовые числа частицы X и n α -частиц соответственно, A, R - массовое число и радиус n α -частичного ядра соответственно.

XHe и его структура

При $1 < a < \infty$ связанные состояния выглядят как атомы Томсона, в которых $n\text{He}$ колеблется вокруг тяжелой отрицательно заряженной частицы.

Потенциал взаимодействия в зависимости от расстояния r между центрами:

$$U_{\text{XHe}}(r) = \begin{cases} -\frac{4e^2n^2}{2R} \left(3 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right), & r < R \\ -\frac{4e^2n^2}{r}, & r > R \end{cases} \quad (1)$$

Расчёты в [2] показывают, что амплитуда таких колебаний будет $\sim 10^{-16}$ см, при этом размеры "тёмного" атома $R > 10^{-13}$ см. Это свидетельствует об устойчивости системы XHe.

Условия на столкновительность XHe

Характерное время взаимодействия τ меньше времени расширения:

$$\tau = \frac{1}{vn_X\sigma} < t \quad (2)$$

где $\sigma = \pi R^2$, $R = 1.2 \cdot 10^{-13} (4n)^{\frac{1}{3}} / (200 \text{ МэВ})$, $v = \sqrt{\frac{2T}{m_X}} c$,

$$t = 1.7 \left(\frac{1 \text{ МэВ}}{T} \right)^2 \text{ с.}$$

$$n_X = \frac{\rho_X}{m_X} = \frac{\rho_{X,0}}{m_X} (z+1)^3 = \frac{5\Omega_{b,0}\rho_c}{m_X} \left(\frac{T}{T_0} \right)^3$$

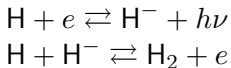
тут мы берём: $\Omega_{b,0} = 0.05$, $T_0 = 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ ЭВ}$, $\rho_c = 4.7 \cdot 10^{-6} \frac{\text{GeV}}{\text{cm}^3}$.

Итог ($m_X = 1 \text{ ТэВ}$):

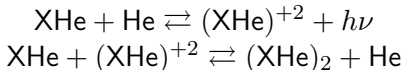
$$T \gtrsim \frac{m_X}{n^{\frac{4}{9}}} \cdot 1.4 \cdot 10^{-8} = \frac{14 \text{ КэВ}}{n^{\frac{4}{9}}} \quad (3)$$

Образование связанных состояний XHe

В нулевом приближении для образования связанных состояний XHe можно привести аналогию с образованием молекулы H₂:



Тогда по аналогии:



Сечение Фоторасщепления [3]:

$$\sigma(\nu) = \frac{6.85 \cdot 10^{-18} \gamma k^3}{(1 - \gamma \varrho)(\gamma^2 + k^2)^3} \text{ см}^2, \quad (4)$$

где k - волновое число отщеплённого электрона (в нашем случае He),
 $\gamma \approx 0,0013$ - параметр, связанный со сродством водорода к электрону,
и $\varrho \approx 2.646$ - эффективная дальность (в случае $n = 1$). γ и ϱ
выражены в а.е.м.

Численный расчёт α_9 и α_4 для $n = 1$

В [3] можно взять коэффициент скорости фоторасщепления:

$$\alpha_9 = \int_{\nu_1}^{\infty} \frac{4F_{\nu}\sigma(\nu)d\nu}{h\nu}. \quad (5)$$

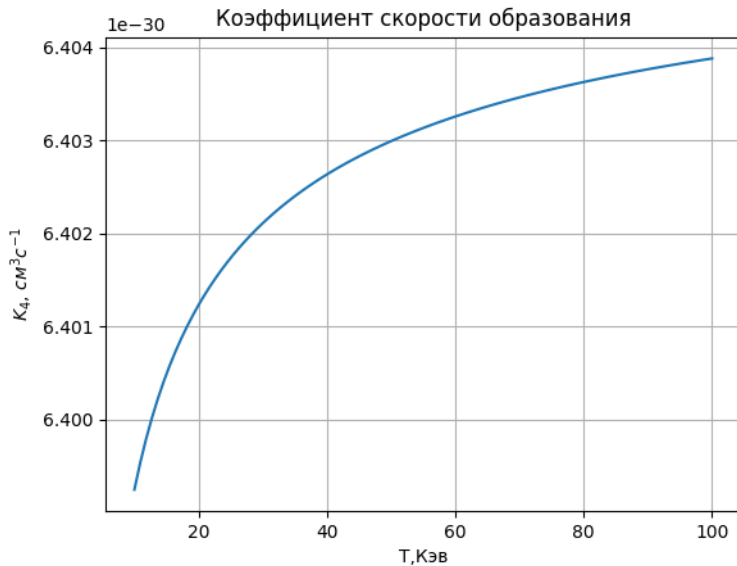
Где $F_{\nu} = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$ - поток излучения А.Ч.Т., выраженный через формулу Планка.

Коэффициент скорости образования:

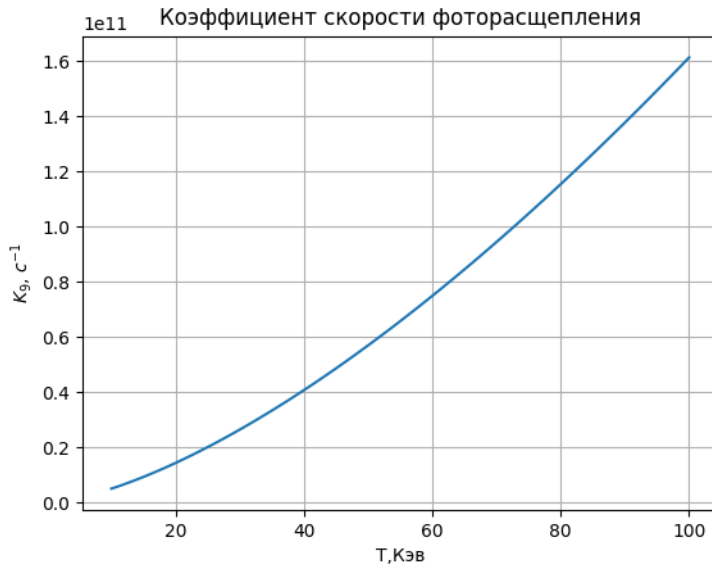
$$\alpha_4 = \int_0^{\infty} \left(\frac{m_{\text{He}}}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{m_{\text{He}}v^2}{2kT}} v\sigma(v)4\pi v^2 dv. \quad (6)$$

Где $\sigma(v) = \frac{1}{2} \left(\frac{h\nu}{mvc} \right)^2 \frac{\sigma(\nu)}{e^{\frac{-h\nu}{kT}}}$ - сечение захвата.

Результаты численного расчёта K_4



Результаты численного расчёта K_9



Численный расчёт α_9 и α_4 для $n > 1$ (Атом Томсона)

Для атома Томсона расчет параметров γ, ϱ производится иначе. Теперь энергию связи представим через формулу Вайцзеккера:

$$E(A, Z) = a_1 A - a_2 A^{2/3} - a_3 \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_4 \frac{(A/2 - Z)^2}{A} + \frac{a_5}{A^{3/4}} \quad (7)$$

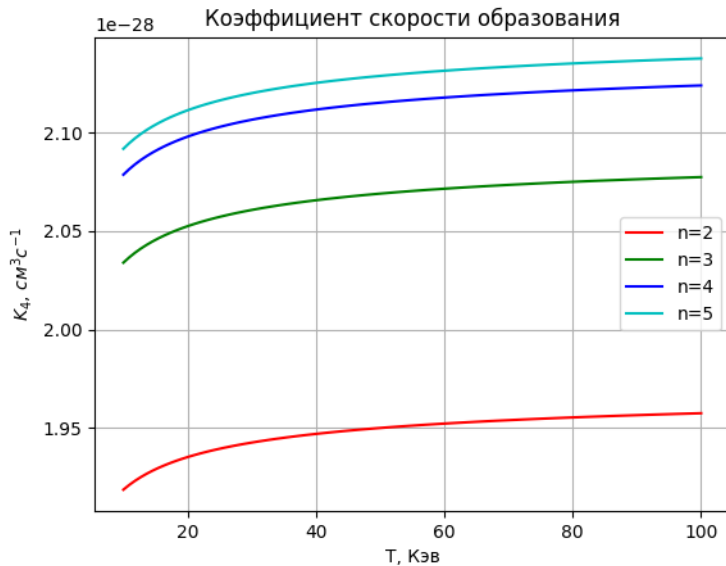
Тогда :

$$\gamma(n) = E(4(n+1), 2(n+1)) - E(4n, 2n) = \quad (8)$$

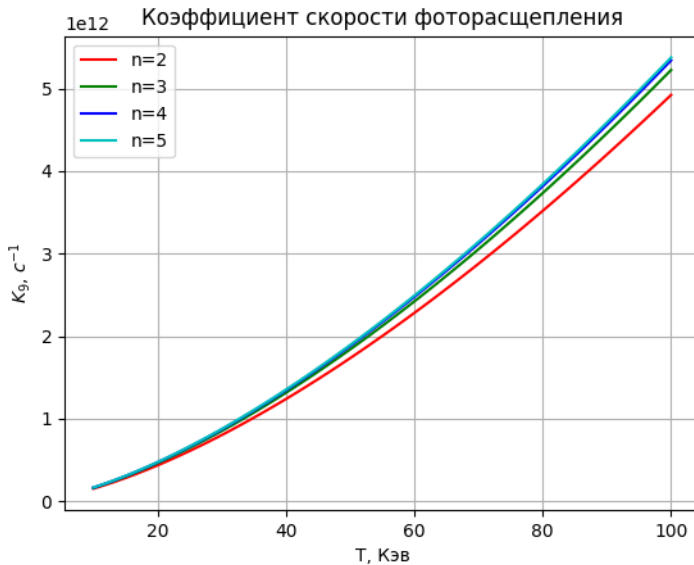
$$= 4a_1 + 2 \cdot 2^{1/3} a_2 \left(n^{2/3} - (n+1)^{2/3} \right) - 2 \cdot 2^{1/3} a_3 \left((n+1)^{5/3} - n^{5/3} \right) \quad (9)$$

В [2] при численном моделировании для небольших $n = 2 - 5$ параметр эффективной дальности остаётся порядка $\varrho(n) \sim 2 - 3$ а.е.

Результаты численного расчёта $K_4(n)$



Результаты численного расчёта $K_9(n)$



Выводы из расчётов

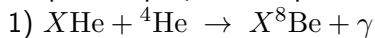
Изучая реакцию с полученными значениями $K_4(n)$ и $K_9(n)$

$$\frac{dn_{(\text{XHe})+2}}{dt} = K_4 \cdot n_{\text{XHe}} n_{\text{He}} - K_9 \cdot n_{(\text{XHe})+2} \quad (10)$$

можно сделать вывод о том, что скорость фоторасщепления на порядки выше скорости образования. Подобный метод оценки нуждается в пересмотре.

Сравнение скоростей двух конкурирующих процессов

Для дальнейшего понимания реакций с $X\text{He}$ требуется сравнить скорости процессов образования $X\text{Be}$ и захвата третьей α - частицы.



Из [4] можно получить скорость первой реакции как сумма резонансного и нерезонансного каналов.

Частота реакции:

$$\Gamma_{X\text{Be}}(T) = \underbrace{0.43 T_9^{3/2} e^{-1.64/T_9}}_{\Gamma_{\text{res}}} + \underbrace{0.02 T_9^3}_{\Gamma_{\text{nr}}} \text{ c}^{-1}, \quad T_9 \equiv T/(10^9 \text{ K}). \quad (11)$$

При характерной температуре синтеза $T \simeq 25 \text{ keV}$ ($T_9 = 0.29$) число α -частиц в плазме $n_{\text{He}} \simeq 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, откуда

$$\sigma v[X\text{He} + {}^4\text{He}] = \frac{\Gamma_{X\text{Be}}}{n_{\text{He}}} \approx 1.4 \times 10^{-21} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}. \quad (12)$$

Скорость захвата третьей α -частицы

Усреднение по Максвеллу:

$$\langle \sigma v \rangle(T) = \left(\frac{8}{\pi \mu} \right)^{1/2} \frac{1}{(kT)^{3/2}} \int_0^\infty \sigma(E) E e^{-E/kT} dE, \quad (13)$$

Разложение сечения:

$$\sigma(E) = \frac{S(E)}{E} P_G(E), \quad (14)$$

где $S(E)$ —астрофизический S -фактор и

$$P_G(E) = \exp \left[-\sqrt{\frac{E_G}{E}} \right], \quad E_G = 2\mu c^2 (\pi \alpha Z_1 Z_2)^2, \quad (15)$$

— фактор Гамова.

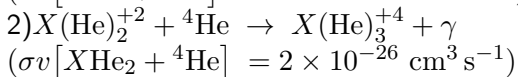
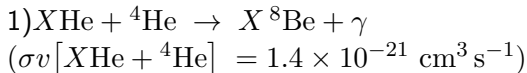
Для нерезонансных α -захватов принимаем [5] [6]

$$S(E) \simeq S_0 = 100 \text{ keV b},$$

что соответствует диапазону экспериментальных значений.

Сравнение скоростей реакций

Изучая две реакции:



Можем сделать вывод, что реакция захвата третьей α -частицы сильно подавлена из-за кулоновского барьера при $T = 25 \text{ KeV}$.

Заключение

- Оценены интервалы температур, при которых тёмные атомы будут столкновительными.
- Получены оценки на коэффициенты скорости образования и фоторасщепления связанных состояний $X\text{He}$ в зависимости от температуры
 $10 \text{ КэВ} \leq T \leq 100 \text{ КэВ}$ для различных n .
- Сравнены скорости двух конкурирующих реакций: образование $X\text{He}$ и захвата третьей α - частицы.



V. Beylin, M. Khlopov, V. Kuksa and N. Volchanskiy, *Hadronic and hadron-like physics of dark matter*, *Symmetry* **11** (2019) 587.



T.E. Bikbaev, M.Y. Khlopov and A.G. Mayorov, *Numerical simulation of bohr-like and thomson-like dark atoms with nuclei*, 2021.



T. de Jong, *The density of h2 molecules in dark interstellar clouds*, Aug, 1972.



E. Akhmedov and M. Pospelov, *Bbn catalysis by doubly charged particles*, 2024.



F. Confortola, D. Bemmerer, H. Costantini, A. Formicola, G. Gyürky, P. Bezzon et al., *Astrophysical reaction measured at low energy via detection of prompt and delayed rays*, *Physical Review C* **75** (2007) .



R. deBoer, J. Görres, M. Wiescher, R. Azuma, A. Best, C. Brune et al., *The reaction and its implications for stellar helium burning*, *Reviews of Modern Physics* **89** (2017) .