

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ СВЯЗАННЫХ СОСТОЯНИЙ ТЕМНЫХ АТОМОВ В РАННЕЙ ВСЕЛЕННОЙ

Полянский Денис Евгеньевич

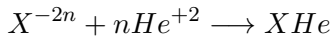
НИЯУ «МИФИ»

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

Отчет о научно-исследовательской работе
Москва, 27 декабря 2023 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 $\sigma = \pi R^2$, $R = 1.2 \cdot 10^{-13} (4n)^{\frac{1}{3}} / (200 \text{ МэВ})$, $v = \sqrt{\frac{2T}{m_X}} c$,

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

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

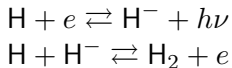
тут мы берём: $\Omega_{b,0} = 0.05$, $T_0 = 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ ЭВ}$, $\rho_c = 4.7 \cdot 10^{-6} \frac{\text{GeV}}{\text{cm}^3}$.

Итог ($m_X = 1 \text{ ТэВ}$):

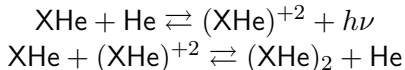
$$T \gtrsim \frac{m_X}{n^{\frac{4}{9}}} \cdot 1.4 \cdot 10^{-8} = \frac{14 \text{ КэВ}}{n^{\frac{4}{9}}} \quad (3)$$

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

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




Результаты численного расчёта

Таблица: Коэффициенты скорости фоторасщепления и образования в зависимости от температуры:

$T, \text{КэВ}$	$\alpha_9, \text{с}^{-1}$	$\alpha_4, \text{см}^3\text{с}^{-1}$
100	$7.29 \cdot 10^{-6}$	$1.84 \cdot 10^{-10}$
75	$4.73 \cdot 10^{-6}$	$1.84 \cdot 10^{-10}$
50	$2.58 \cdot 10^{-6}$	$1.84 \cdot 10^{-10}$
25	$9.11 \cdot 10^{-7}$	$1.84 \cdot 10^{-10}$
10	$2.30 \cdot 10^{-7}$	$1.84 \cdot 10^{-10}$

Заключение

- В работе рассматривается гипотеза составной скрытой массы, в которой гипотетические стабильные частицы с зарядом $-2n$ образуют нейтральные атомоподобные состояния $X\text{He}$ с первичными ядрами гелия.
- Оценены интервалы температур, при которых тёмные атомы будут столкновительными.
- Рассмотрен вариант образования связанных состояний $X\text{He}$, как аналогия с образованием молекулы водорода.
- Получены оценки на коэффициенты скорости образования и фоторасщепления в зависимости от температуры $10 \text{ КэВ} \leq T \leq 100 \text{ КэВ}$ при $n = 1$.

-  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.