

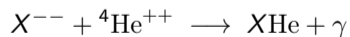
Аномальные изотопы в моделях атомов скрытой массы

М. И. Балиньо

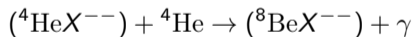
НИЯУ МИФИ

2026

- В этой модели скрытая масса состоит из атомов, в которых тяжёлая стабильная частица с зарядом $-2n$ (обозначим её как X^{-2n}) связана с ядрами гелия.
- В простейшем случае $n = 1$ система состоит из:
 - одной частицы X с зарядом -2 ;
 - одного ядра ${}^4\text{He}$ с зарядом $+2$.

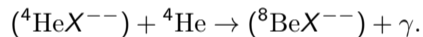


- Атомы $X\text{He}$, могут взаимодействовать с лёгкими ядрами.
- В частности, возможен захват ещё одного ядра ${}^4\text{He}$, что приводит к образованию аномального изотопа $X\text{Be}$:



Цель работы состоит в описании процесса формирования аномальных изотопов $X\text{Be}$,

Ключевой процесс:



Для его описания необходимо определить свойства начальной системы $X^{--} - ^4\text{He}$ и конечной системы $X^{--} - ^8\text{Be}$.

Используемое приближение:

- частица X^{--} считается тяжелым лептоном, значительно тяжелее ядер;
- её положение отождествляется с началом координат;
- взаимодействие определяется кулоновским притяжением с учётом конечного размера ядра.

Общий вид потенциала для распределённых систем:

$$U(\vec{r}) = \int d^3r_1 d^3r_2 v(|\vec{r} + \vec{r}_2 - \vec{r}_1|) \rho_1(\vec{r}_1) \rho_2(\vec{r}_2).$$

Далее этот подход применяется отдельно к системам $X^{--} - {}^4\text{He}$ и $X^{--} - {}^8\text{Be}$.

Потенциалы взаимодействия $X^{--} - {}^4\text{He}$

Для системы $X^{--} - {}^4\text{He}$ были рассмотрены два приближения для кулоновского потенциала.

1. Равномерно заряженная сфера

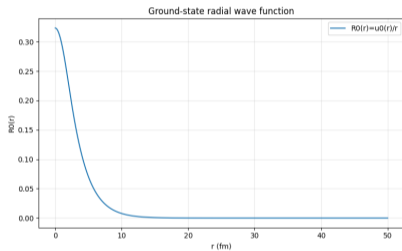
$$V_{\text{sphere}}(r) = \begin{cases} -\frac{Z_X Z_{\text{He}} \alpha \hbar c}{2R_N} \left(3 - \frac{r^2}{R_N^2} \right), & r \leq R_N, \\ -\frac{Z_X Z_{\text{He}} \alpha \hbar c}{r}, & r > R_N. \end{cases}$$

2. Потенциал через плотность заряда ядра

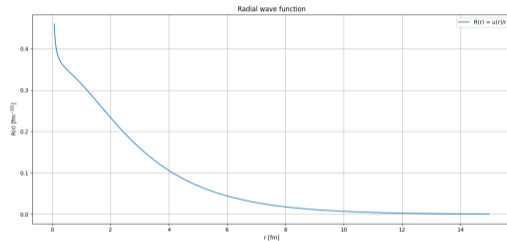
$$V_{\rho}(r) = -Z_X \alpha \hbar c \int \frac{\rho_{\text{He}}(R)}{|r - R|} d^3R.$$

Здесь $Z_X = 2$, $Z_{\text{He}} = 2$, R_N — радиус равномерно заряженной сферы, а $\rho_{\text{He}}(R)$ — плотность заряда ядра ${}^4\text{He}$.

Волновые функции $X^{--} - {}^4\text{He}$



Равномерно заряженная сфера
 $E_0 = -1.256$ MeV



Зарядовая плотность ядра ${}^4\text{He}$
 $E_0 = -1.1675$ MeV

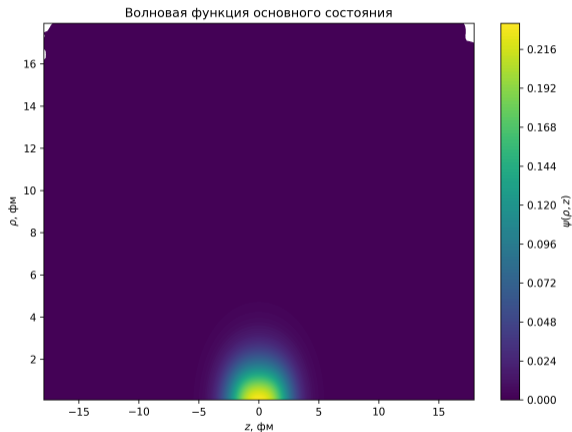
Ядро ${}^8\text{Be}$ рассматривается в α -кластерной модели:

$${}^8\text{Be} \approx \alpha + \alpha.$$

Зарядовая плотность задаётся как сумма двух смещённых плотностей ${}^4\text{He}$:

$$\rho_{\text{Be}}(\vec{R}, \vec{s}) = \rho_{\text{He}}\left(\vec{R} - \frac{\vec{s}}{2}\right) + \rho_{\text{He}}\left(\vec{R} + \frac{\vec{s}}{2}\right).$$

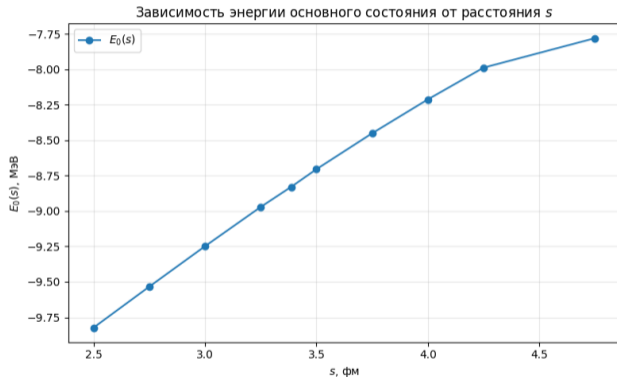
Здесь $s = |\vec{s}|$ — расстояние между двумя α . В отличие от $X^{--} - {}^4\text{He}$, потенциал уже не является сферически симметричным.



Основной результат:

- волновая функция локализуется в области между двумя α ;
- энергия связи чувствительна к выбранному расстоянию s ;
- модель явно учитывает разделение двух α -частиц.

Зависимость энергии от расстояния s



При увеличении расстояния между α энергия связи системы уменьшается:

$$E_0 : -9.82 \text{ MeV} \rightarrow -7.78 \text{ MeV}.$$

Связанное состояние чувствительно к внутренней конфигурации ядра ${}^8\text{Be}$.

В работе Ахмедова и Поспелова [1] ядра описывались как равномерно заряженные сферы. В этом приближении получены энергии связи:

$$X^{--} - {}^4\text{He} : 1.156 \text{ MeV}, \quad X^{--} - {}^8\text{Be} : 3.40 \text{ MeV}.$$





Для $X^{--} - {}^4\text{He}$ наш результат близок к этому значению. Для $X^{--} - {}^8\text{Be}$ отличие значительно сильнее, потому что в данной работе учитывается разделение двух α , а в сферически симметричном приближении эта информация теряется.

- 1 Для системы $X^{--} - {}^4\text{He}$ учёт конечного размера ядра изменяет поведение волновой функции в области малых расстояний.
- 2 Для системы $X^{--} - {}^8\text{Be}$ важна α -кластерная структура ядра и расстояние между двумя α -частицами.
- 3 Энергия основного состояния $X\text{Be}$ заметно зависит от параметра s .
- 4 Полученные характеристики можно использовать как основу для дальнейшей оценки концентрации аномальных изотопов $X\text{Be}$.

Спасибо за внимание!

М. И. Балиньо

НИЯУ МИФИ

-  E. Akhmedov and M. Pospelov, *BBN catalysis by doubly charged particles*, arXiv:2405.06019 [hep-ph], 2024.
-  A. S. Bazhin and V. V. Samarin, “Study of the Structure of the ${}^9\text{Be}$ Nucleus in the Alpha-Cluster Model by the Method of Hyperspherical Functions,” *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* **88**, no. 8, 1177–1184 (2024). doi: 10.1134/S1062873824707281.
-  R. N. Cahn and S. L. Glashow, “Chemical Signatures for Superheavy Elementary Particles,” *Science* **213**, no. 4508, 607–611 (1981). doi: 10.1126/science.213.4508.607.
-  K. Kohri and F. Takayama, “Big Bang Nucleosynthesis with Long-Lived Charged Massive Particles,” arXiv:hep-ph/0605243 (2006).