

Катализ термоядерного синтеза при помощи частиц с двойным зарядом

Докладчик:

Охотников Артем Витальевич

План доклада

1. Мюонный катализ ядерных реакций синтеза
2. Двойные заряженные частицы в расширениях СМ
3. Схема катализа с участием X^{--}
4. Необходимые свойства частицы X и способы ее производства

Науке известны 2 способа высвобождения ядерной энергии:
деление и синтез.

- Проблема ядерных реакторов – ограниченность мировых запасов урана. Разведанных запасов нам хватит на 150-200 лет.(*)
- Проблема термоядерных реакторов – *их просто нет*: в настоящее время затраты энергии на поддержание реакции превосходят ее выход.

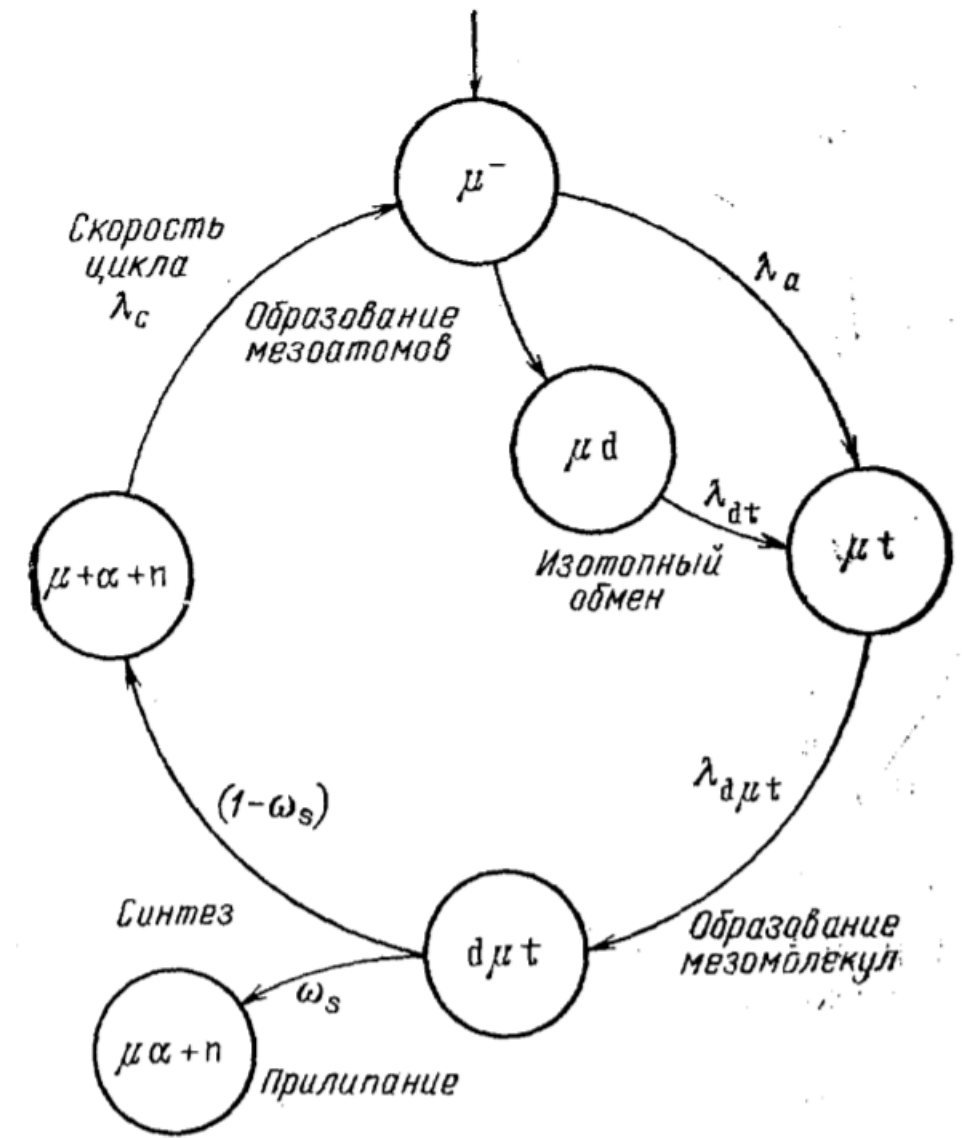
Для создания реакторов нужно либо уменьшить траты энергии на их работу, либо ускорить реакцию синтеза.

(*) OECD Nuclear Energy Agency: *Uranium 2016: Resources, Production and Demand*, p. 124

Ускорить синтез можно путем введения катализатора.

Рассмотрим на примере мюонного катализа:

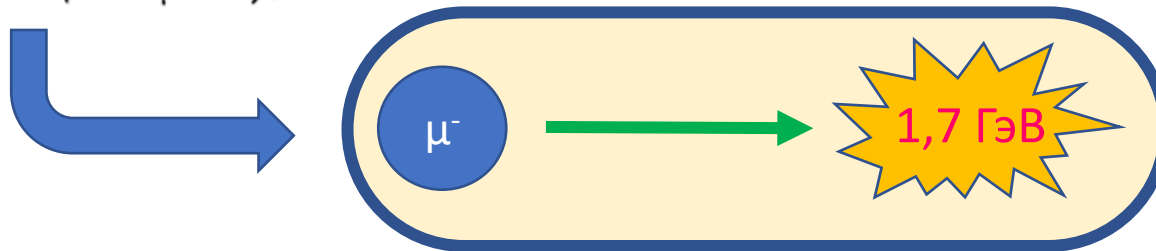
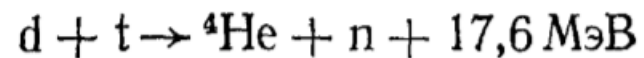
1. В смесь (^1H , ^2H , ^3H) вводятся мюоны.
2. Мюоны образуют мезоатомы изотопов водорода: μ , $d\mu$, $t\mu$, а затем – мезомолекулы $pp\mu$, $pd\mu$, $dt\mu$ и т.д.
3. Мюон тяжелее электрона, поэтому мезомолекулы меньше обычных => реакция слияния идет быстрее.
4. Мюон уносится мезоатомом μHe с вероятностью, называемой коэффициентом прилипания (ω_s), или освобождается и повторно участвует в процессе.



Размер молекулы H_2 составляет $\sim 2a_0 = 2\hbar^2/m_e e^2 \approx 10^{-8}$ см в н.у.

Размер мезомолекулы $pp\mu$ равен $\sim 2a_\mu = 2\hbar^2/m_\mu e^2 \approx 5 \cdot 10^{-11}$ см, что соответствует молекуле водорода, нагретой до $3 \cdot 10^7$ К – **успех!**

Минимальный $\omega_s = 0,43\%$ при образовании $d t \mu \Rightarrow \sim 100$ реакций на мюон.



1 мюон способен дать до 1,7 ГэВ, что в 5 раз меньше, чем тратится на его создание и удержание – **проблема!**

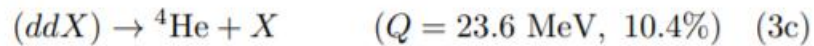
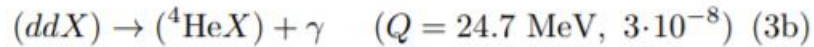
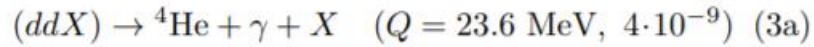
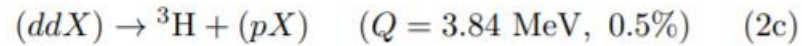
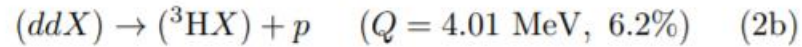
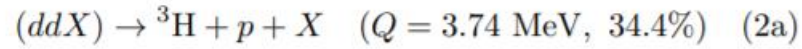
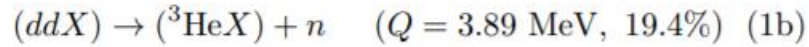
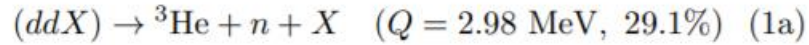
(Phys. Rev. **106**, 330 (1957))

Свойства X^- в рассматриваемой модели

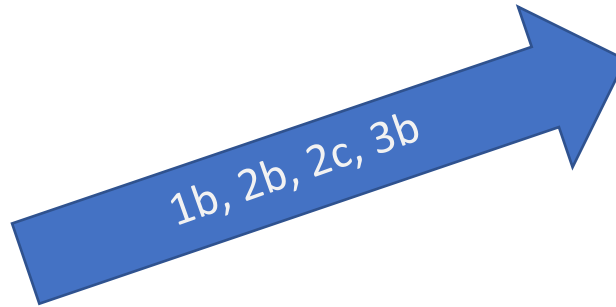
- $m_X \sim 1 \text{ ТэВ}$
- τ_X велико (оценка будет дана позже)
- Рассматриваем только э/м взаимодействие

Установка: сжиженный или сжатый D_2 , в который подаются X^-

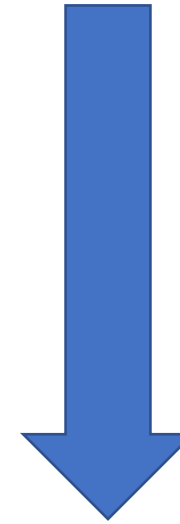
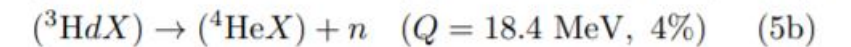
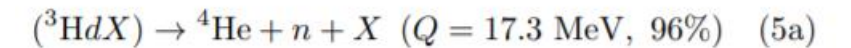
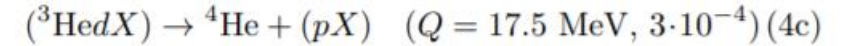
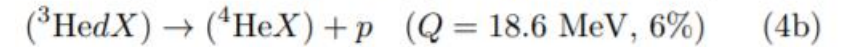
Stage I



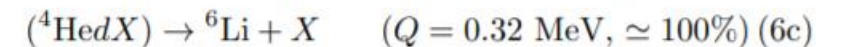
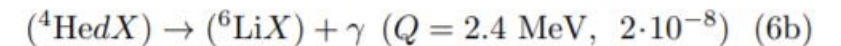
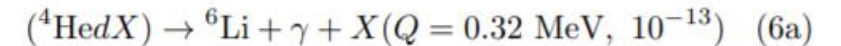
- 2c: $(pX)+d \rightarrow (dX)+p+50\text{keV}$
- 4a-с: ион $({}^3\text{HedX})^+$ образуется и является стабильным (Acta Phys. Hung. A **8**, 285 (1998))
- 6a-с: аналогично для $({}^4\text{HedX})^+$



Stage II

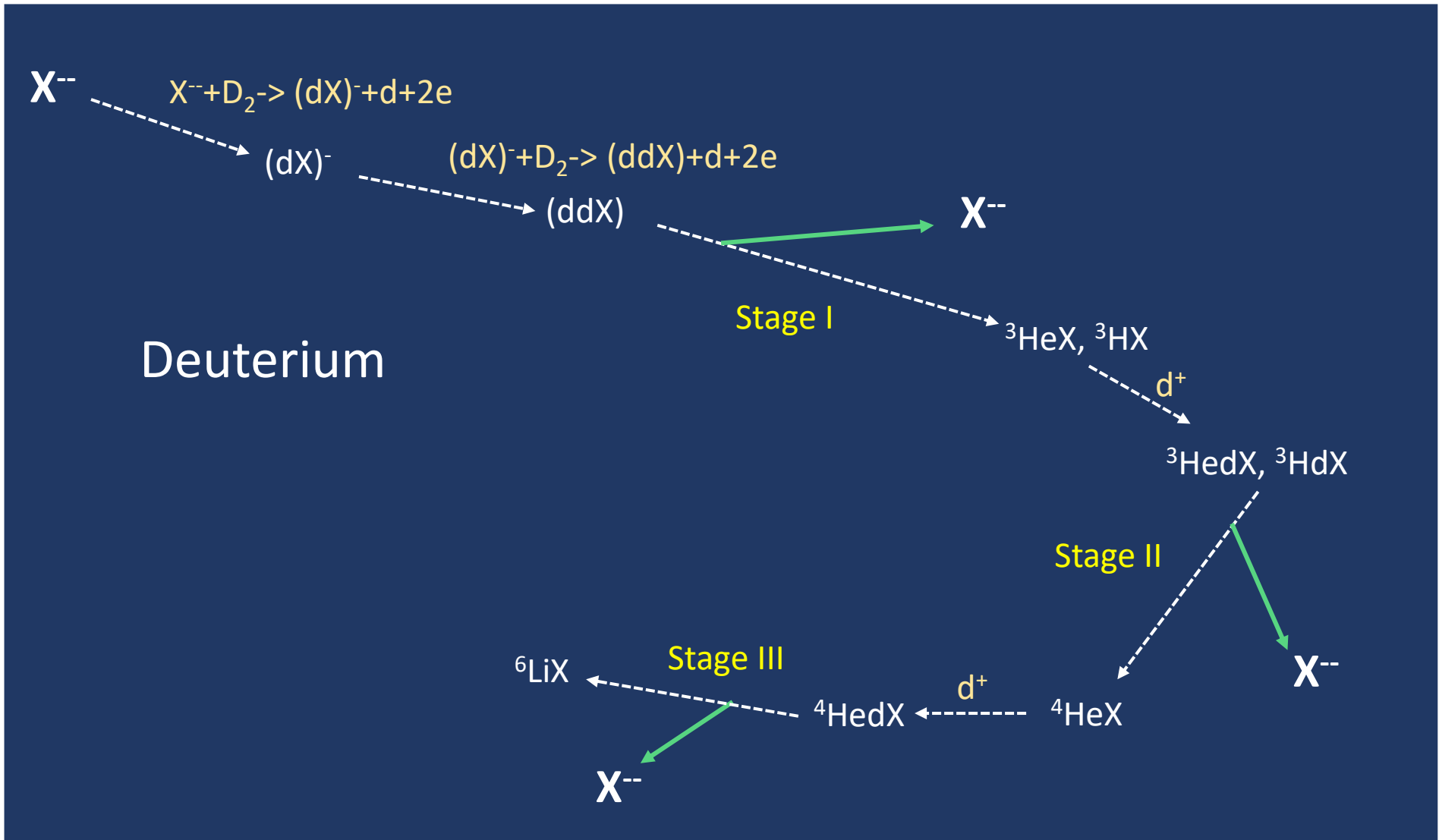


Stage III



Итог:




 X^{--}




- $P(X \rightarrow {}^6\text{Li}X) \sim 2,8 \cdot 10^{-10} \Leftrightarrow 3,5 \cdot 10^9$ циклов на частицу.
- Таким образом, с одной X-частицы можем получить в среднем $7 \cdot 10^4$ ТэВ.
- $\tau(({}^3\text{He}dX)^+) \sim 10^{-8} \text{ с} \Rightarrow \tau_X \sim 100 \text{ с}$ необходимо

С учетом энергии, потребной для создания пары X^-X^{++} , необходима реактивация X, связанных с Li.

Для компенсации затрат на рождение пары XX необходимо $\tau_X \sim 30$ тыс. лет
(arXiv:2109.13960v1)

- Способ реактивации: диссоциировать ионы LiX, разместив мишени вокруг активной зоны реактора.
- $E_{св}(LiX) = 2 \text{ МэВ}$
- Для рассеяния на мишени нужно разогнать пучок до 0,05 ГэВ. При этом $\sigma > 0,1 \text{ бн}$.
- Ожидаемые затраты на реактивацию составят 10^{-9} от производимой энергии.

Возможность добычи X^- в земной коре

- Необходимое условие – стабильность частиц
- Возможность существования подобных состояний подтверждена Science **213**, 607-611 (1981)
- Установлен верхний предел на концентрацию ($X^{++}ee$): $10^{-12} - 10^{-17}$ на атом в зависимости от m_X .
- В случае успеха можно обойтись без реактивации (LiX)

ИТОГИ

- Рассмотрен процесс катализа реакций ядерного синтеза путем использования долгоживущих экзотических частиц с зарядом $2e$ (X-частиц).
- Определены свойства X-частиц, необходимые для участия в данном процессе
- Рассмотрена принципиальная возможность использования данного процесса в термоядерном реакторе
- Рассмотрены возможности производства X-частиц на ускорителе и добычи в земной коре