

Оценка чувствительности экспериментов с жидким аргоном к двойному К-захвату на ^{36}Ar

Лычагина Ольга

Научный руководитель: д.ф.-м.н., проф. А.Г. Ольшевский

Научный консультант: к.ф.-м.н. О.Ю. Смирнов

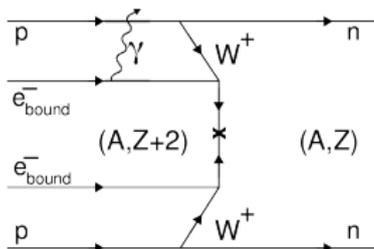
МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, кафедра ФЭЧ

27 мая 2022 г.

Введение

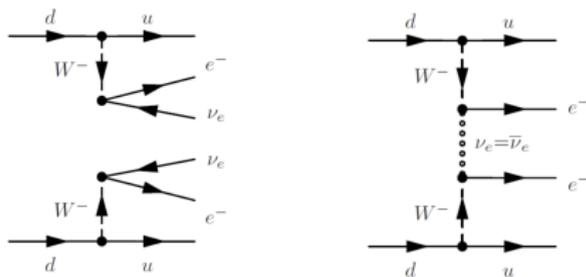
2e-захват

- $(2EC2\nu)$ – найден для ^{124}Xe в эксперименте XENON1T ($T_{1/2}^{2EC2\nu} = 1,8 \times 10^{22}$ лет);
- установлены пределы для ^{85}Kr в Баксанской лаборатории ($T_{1/2}^{2EC2\nu} > 1,9 \times 10^{22}$, УД = 90%);
- $(2EC0\nu)$ – не найден



2β -распад

- $(2\beta 2\nu)$ – экспериментально подтвержден для более чем 10 ядер
- $(2\beta 0\nu)$ – не найден



Регистрация $2\beta 0\nu$ - или $2EC0\nu$ -распада подтвердит майорановскую природу нейтрино.

Цель и задачи работы

Цель

Оценка чувствительности эксперимента DarkSide-50 к двухнейтринному двойному электронному захвату на изотопе ^{36}Ar .

Задачи

- разработка программного модуля для построения энергетического спектра двойного электронного захвата ($2\text{EC}2\nu$) на ^{36}Ar ;
- применение функции отклика детектора, обусловленного этим эффектом, для детектора DarkSide-50;
- статистический анализ данных с использованием модели спектра;
- получение нижнего предела для периода полураспада ^{36}Ar .

Новизна

Подобные исследования **ранее не проводились** на изотопах аргона.

Эксперимент DarkSide-50

DarkSide-50 – эксперимент по поиску частиц темной материи; двухфазная время-проекционная камера, наполненная жидким сверхчистым аргоном.

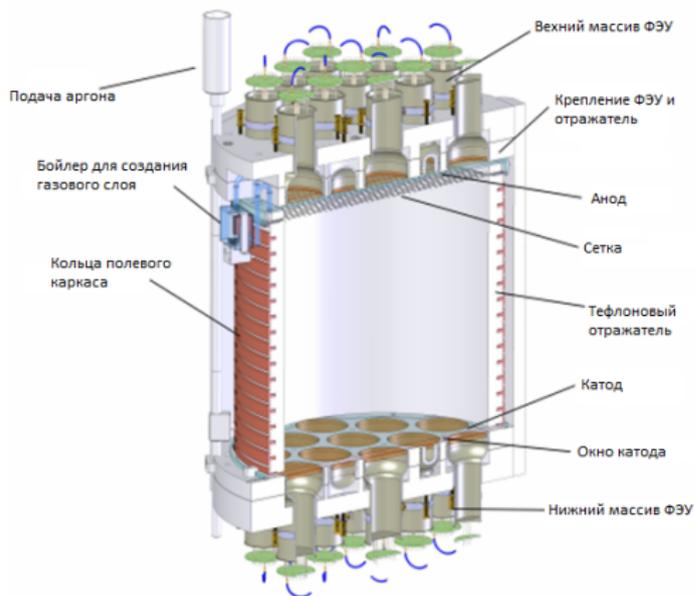


Схема время-проекционной камеры

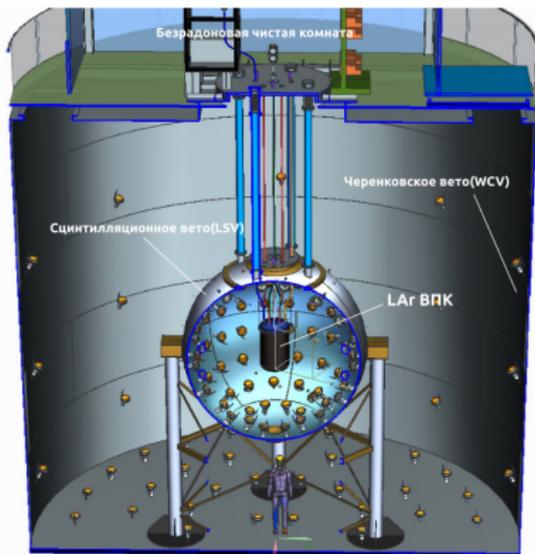
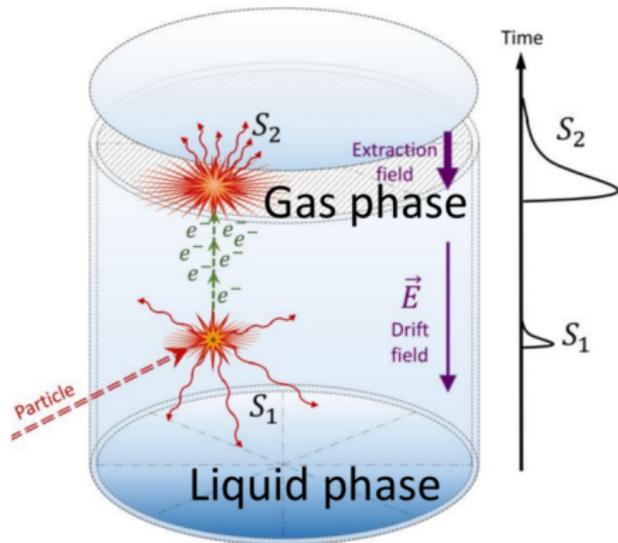


Схема детектора

Принцип регистрации частиц детектором DarkSide-50



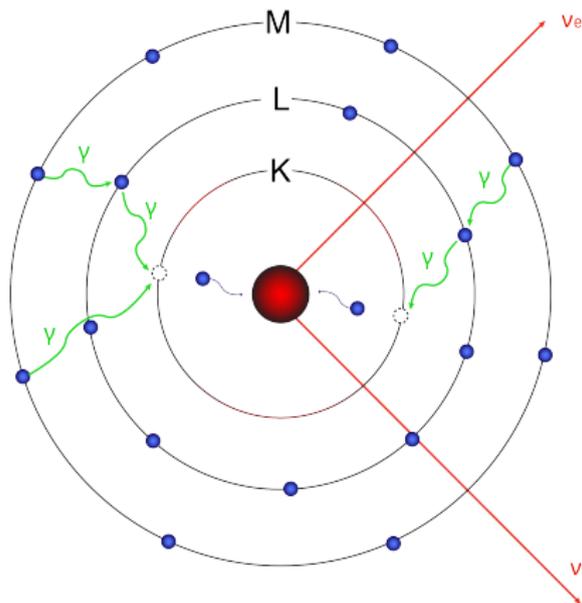
- Частица вызывает сцинтилляционную вспышку (S1) и ионизацию среды;
- Происходит электролюминесценция в газовой среде (S2).
- Временной интервал между S1 и S2 позволяет определить координату Z;
- По S2 можно восстановить координаты (X, Y);
- Отношение амплитуд S1 и S2 используется для дискриминации событий от электрона и ядра отдачи.

Подземный аргон — рабочее вещество DarkSide-50

- ^{40}Ar образовался при распаде ^{40}K : $^{40}\text{K} + e^- \rightarrow ^{40}\text{Ar} + \nu_e + \gamma$
- ^{39}Ar является источником фона для детектора и ограничивает чувствительность при низких энергиях;
- ^{39}Ar образуется в атмосфере под действием космических лучей:
 $^{40}\text{Ar} + n \rightarrow ^{39}\text{Ar} + 2n + \gamma$;
Использование аргона из подземных месторождений позволит снизить вклад данной компоненты;
- Подавляющая часть космического аргона состоит из изотопов ^{36}Ar и ^{38}Ar , т.к. калий распространен в космосе примерно в 50 000 раз меньше, чем аргон (на Земле калий преобладает над аргоном в 660 раз).
- ^{36}Ar образуется при нуклеосинтезе в массивных звёздах;
- концентрация атмосферного ^{36}Ar сильно превышает концентрацию подземного ^{36}Ar .

Двойной электронный захват

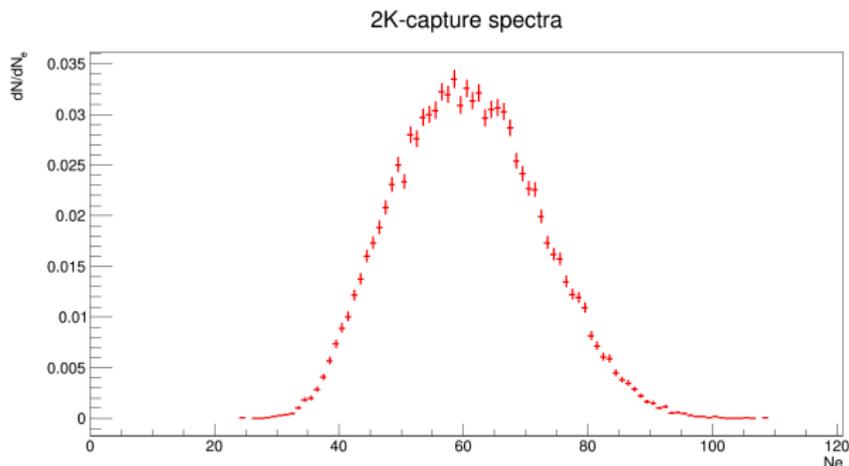
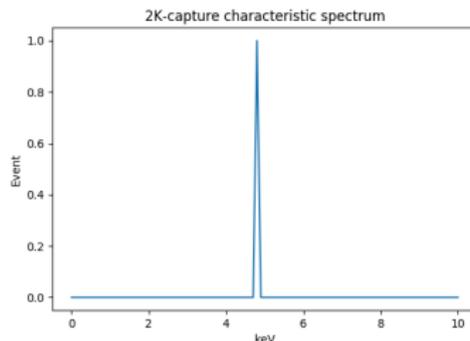
- Два протона в ядре одновременно захватывают два электрона с К-оболочки, при этом испускаются два нейтрино.
- Задача детектирования двойного электронного захвата сводится к регистрации характеристических квантов флуоресценции, возникающих при заполнении двух образующихся вакансий.
- $E_{2EC2\nu} \approx 4,8$ кэВ.



Анализ данных эксперимента

Моделирование спектральной компоненты 2К-захвата

- Анализ реализуется с помощью программного пакета *DarkSide-50:lowmass*
- Вверху: Спектр характеристического излучения от 2К-захвата
- Внизу: Спектр отклика детектора от 2К-захвата



Предварительная оценка периода полураспада ^{36}Ar

- $a(^{36}\text{Ar}) \approx (0,0025 \div 0,334)\%$ - пределы распространенности ^{36}Ar в подземном аргоне^{1,2}
- $n = \frac{a}{M} \cdot m = (6,3 \cdot 10^{-4} \div 8,4 \cdot 10^{-2})$ моль ^{36}Ar содержится в 1 кг LAr
- $E_{2\nu 2\text{EC}} \approx 4,8$ кэВ $\sim 60e^-$ ионизации,
- Фон при этой энергии составляет ~ 2100 событий/ $1e^-$.
- Общий фон для экспозиции $N_{\text{bg}} = 32550$ событий.
- Время экспозиции $T = 532,4$ дня, масса мишени $M_{\text{LAr}} \approx 31,3$ кг.
- Вероятность двухфотонной флуоресценции $\epsilon = 50\%$.

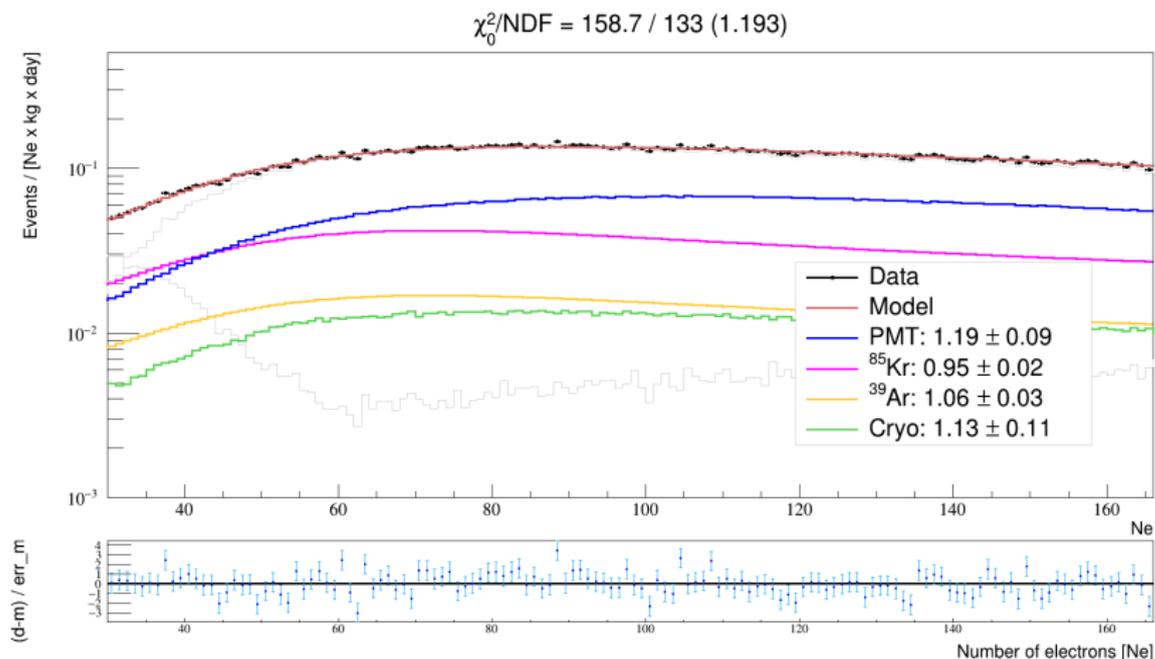
$$T_{1/2} = \ln(2) \frac{N(^{36}\text{Ar})}{\sqrt{N_{\text{bg}}}} M_{\text{LAr}} \cdot T \cdot \epsilon \approx (3,4 \cdot 10^{19} \div 4,5 \cdot 10^{21}) \text{ лет} \quad (1)$$

¹ F. Humbert Earth Planet. Sci. Lett., vol. 152, pp. 101–12, 1997.

² P. Sarda, T. Staudacher, and C. Allgre Earth Planet. Sci. Lett., vol. 72, pp. 357–75, 1985

Анализ данных эксперимента

Наилучшая подгонка фона

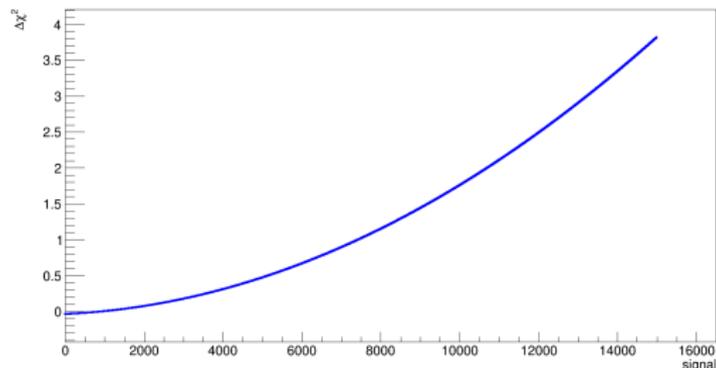


Наилучшая подгонка экспериментальных данных моделью фона (коричневая линия) и парциальные вклады фоновых компонент в эту модель в пределах $[30, 166] N_e$.

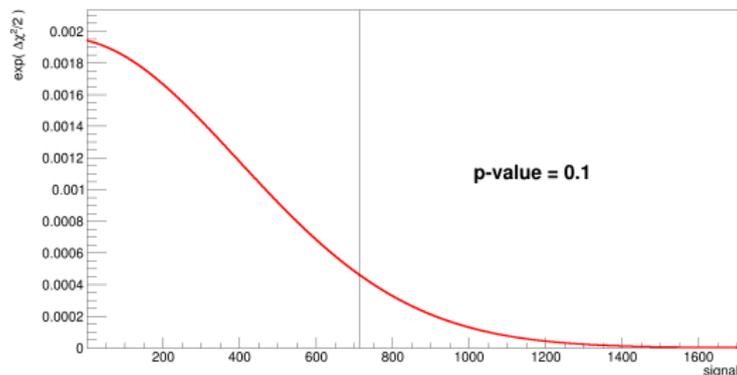
Анализ данных эксперимента

- $\Delta y_i = data_i - model_i$
- $\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta y_i}{\sigma_i}\right)^2$; i -номер бина
- $\Delta\chi^2_{signal} = \chi^2_{signal} - \chi^2_0$;
- $L = e^{-\sum_i \frac{\Delta y_i^2}{2\sigma_i^2}} = e^{-\frac{1}{2}\chi^2}$;

signal = 11051 на уровне достоверности 90%;

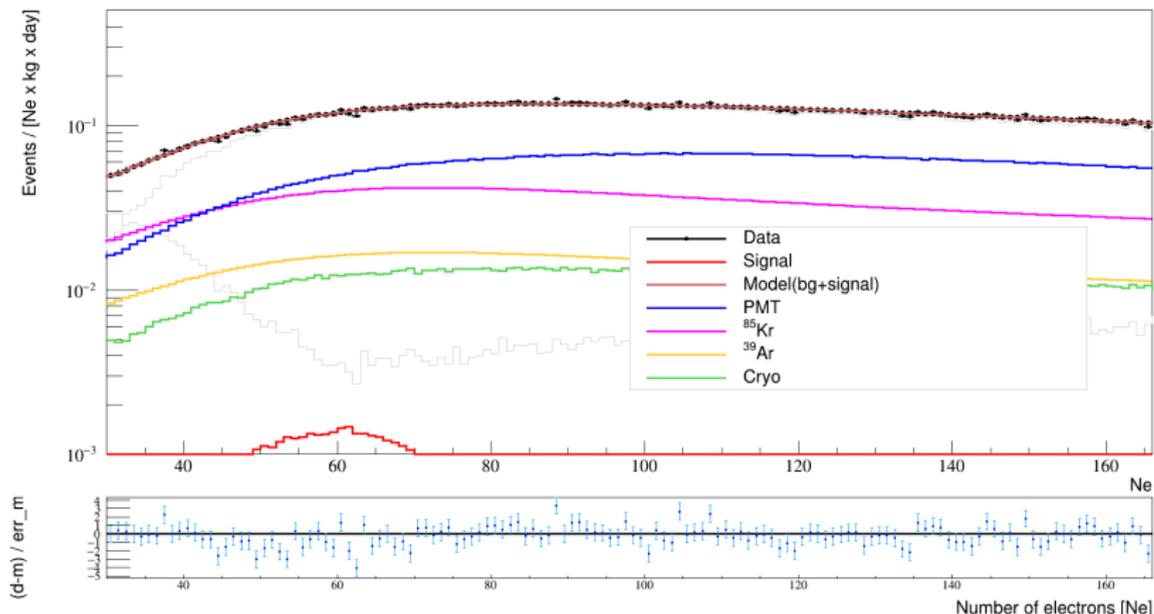


- Вверху: Изменение $\Delta\chi^2$ с ростом амплитуды сигнала
- Внизу: Зависимость функции максимального правдоподобия от $\Delta\chi^2$



Анализ данных эксперимента

$$\chi^2/\text{NDF} = 161.6 / 133 (1.22)$$



Подгонка экспериментальных данных моделью фона и сигнала для уровня достоверности 90%. Подгонка выполнялась в пределах $[30,166]\text{N}_e$.

Анализ данных эксперимента

Оценка времени жизни изотопа ^{36}Ar для 2К-захвата

- Время экспозиции $T = 534,2$ дня
- масса мишени детектора $M = 31,3$ кг
- $M(^{36}\text{Ar}) = 39,948$ г/моль
- распространенность изотопа ^{36}Ar в UAr: $\eta = (0,0025 \div 0,334)\%$
- $N_{2\nu 2\text{EC}} = 11051$ событий
- вероятность двухфотонной флуоресценции $\epsilon \approx 50\%$

$$T_{1/2} = \ln(2) \frac{\eta N_A M T \epsilon}{M(^{36}\text{Ar}) N_{2\nu 2\text{EC}}} > (1,2 \cdot 10^{19} \div 1,1 \cdot 10^{21}) \text{ лет на уровне достоверности } 90\%$$

Результаты

Текущий результат ^{36}Ar

$$T_{1/2} > (1,2 \cdot 10^{19} \div 1,1 \cdot 10^{21}) \text{ лет на уровне достоверности } 90\%$$

Ожидаемый результат ^{36}Ar для DarkSide-20k

$$T_{1/2}^{\text{DS-20k}} \sim 1,5 \cdot 10^4 T_{1/2}^{\text{DS-50}} \text{ лет}$$

Результат XENON ^{124}Xe

$$T_{1/2} > (1,8 \pm 0,5 \pm 0,1) \times 10^{22} \text{ лет.}$$

Выводы

В ходе работы были выполнены следующие задачи:

- в пакет анализа данных добавлен энергетический спектр двойного электронного захвата;
- создана модель функции отклика детектора, обусловленная этим эффектом, для детектора DarkSide-50;
- проведен статистический анализ данных с использованием модели спектра;
- Произведена оценка чувствительности эксперимента DarkSide-50 к двухнейтринному двойному электронному захвату на изотопе ^{36}Ar :

$$T_{1/2} > (1,2 \cdot 10^{19} \div 1,1 \cdot 10^{21}) \text{ лет} \\ \text{на уровне достоверности 90\%}$$