

СОБСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ СИГНАЛА В ЖИДКОМ АРГОНЕ

Подготовил: Озеров Сергей 409 группа

Научный Руководитель: д-р физ.-мат. наук

Смирнов Олег Юрьевич

НИЗКОФОНОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Низкофоновые эксперименты направлены на поиск редких физических процессов:

Двойной бета-распад;

Нейтринные осцилляции;

Взаимодействия частиц темной материи;

Для таких задач требуется точное понимание отклика детектора и всех вкладов в энергетическое разрешение

Что такое энергетическое разрешение?

Энергетическое разрешение показывает, насколько точно детектор восстанавливает энергию частицы. Если частицы имеют одну и ту же энергию E_0 , то в реальном детекторе мы получаем пик с шириной:

$$R = \frac{\sigma_E}{E}$$

Откуда берётся ширина пика?

Вклады:

$$v(Q) = \frac{1+v_1}{Q} + v_P + \frac{Q_1}{Q} v_{1int} \quad [1]$$

Здесь:

$\frac{1+v_1}{Q}$ - статистический вклад;

v_P - неоднородность сбора света;

$\frac{Q_1}{Q} v_{1int}$ - собственное разрешение сцинтиллятора;

v_1 - относительная дисперсия сигнала ФЭУ, соответствующая одноэлектронному отклику;

Q_1 - заряд, соответствующий 1 МэВ (количество фотоэлектронов)

ЧТО ТАКОЕ СОБСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ?

Собственное разрешение— это предельное значение энергетического разрешения сцинтилляционного сигнала в идеальном детекторе. Даже если детектор идеальный:

весь свет собирается;

фотодетекторы работают идеально;

геометрия полностью однородна;

всё равно остаются флуктуации рождения сцинтилляционных фотонов.

В модели:

$$v_{int}(E) = \frac{Q_1}{Q(E)} v_{1int}$$

РОЛЬ НЕЛИНЕЙНОСТИ СВЕТОВОХОДА

Средний сигнал от электрона:

$$Q(E) = LY \cdot E \cdot f_{NL}(E)$$

где:

LY – световойход при 1 MeV;

E – энергия электрона;

$f_{NL}(E)$ - нелинейность световыхода.

Если $f_{NL}(E) = 1$ -световойход линейный.

Если $f_{NL}(E) \neq 1$ – нелинейная зависимость световыхода от энергии электрона

ПОЧЕМУ ГАММА-КВАНТЫ ОСОБЕННЫЕ?

Гамма-квант вносит дополнительное уширение энергетической линии из-за нелинейности световых выходов. В области энергий до нескольких МэВ гамма обычно теряет энергию через последовательность комптоновских рассеяний:

$$Q_\gamma = \sum_i Q_e(E_i)$$

То есть полный сигнал гамма-кванта - сумма сигналов от отдельных электронов.

Из-за нелинейности:

$$Q_\gamma \neq Q_e(E_\gamma)$$

Электрон с энергией E и гамма-квант с той же полной энергией могут дать немного разный световой сигнал. Гамма-квант отдаёт энергию нескольким электронам, и каждый электрон попадает в свою область функции $f_{NL}(E)$. Поэтому возникает дополнительный гамма-вклад:

$$v_\gamma = \frac{\sigma_{Q_\gamma}^2}{\mu_{Q_\gamma}^2}$$

КАК ЭТО СВЯЗАНО С НАШЕЙ ЗАДАЧЕЙ?

Цель расчёта:

$$v_{\gamma}(E) = \frac{\text{Var}(Q_{\gamma})}{\langle Q_{\gamma} \rangle^2}$$

Мы сравнивали два случая:

$$f_{NL}(E) = 1 \text{ и } f_{NL}(E) \neq 1$$

Задача: оценить гамма-вклад, с учетом нелинейности световыхода для электрона в жидком аргоне

КАК БЫЛ УСТРОЕН РАСЧЁТ В GEANT4?

В моделировании:

среда — жидкий аргон;

первичная частица — γ -квант;

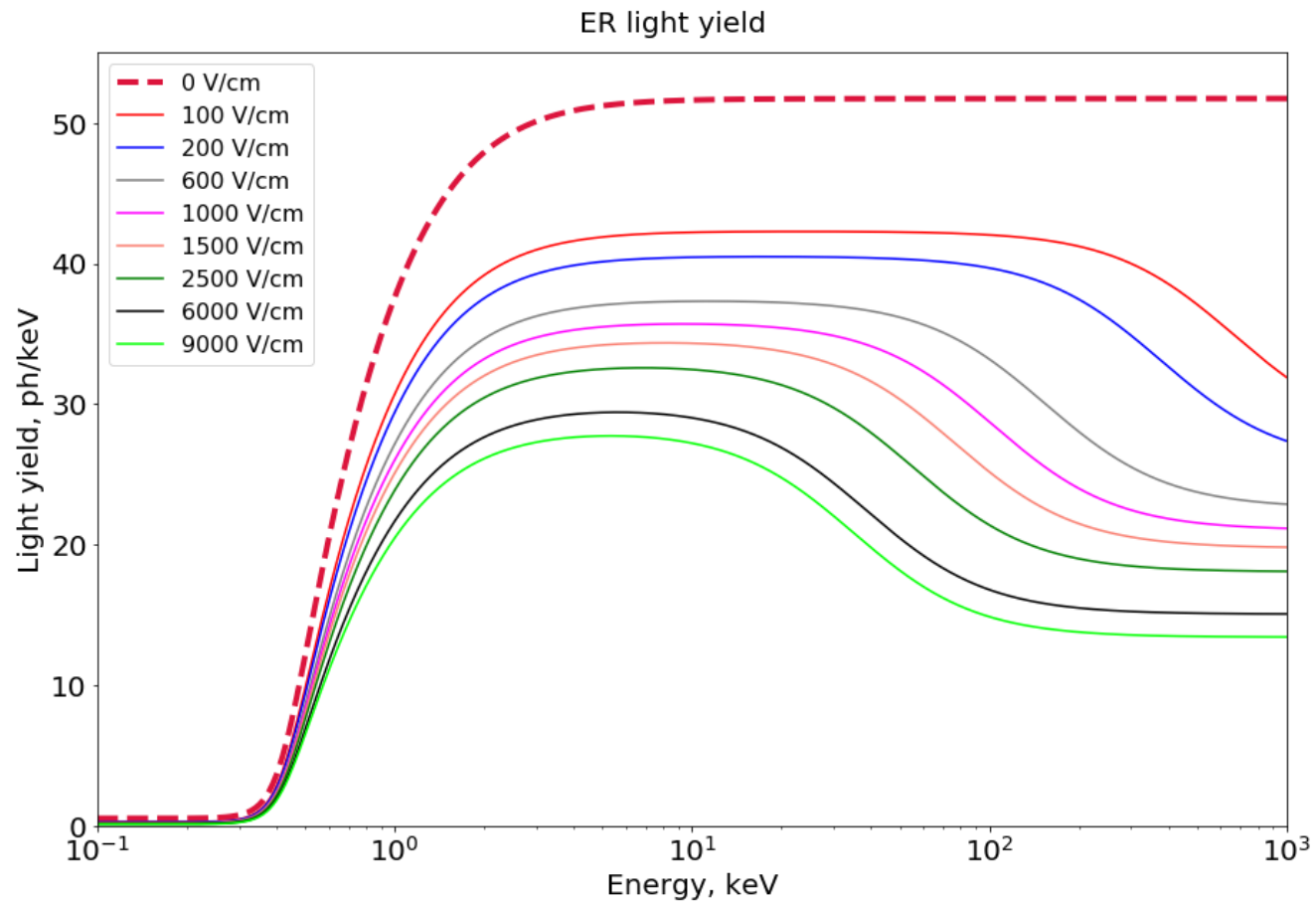
учитывались процессы комптоновского рассеивания и фотоэффект ;

для каждого события считался суммарный сигнал Q ;

число событий для каждой энергии:

$$N = 10^6$$

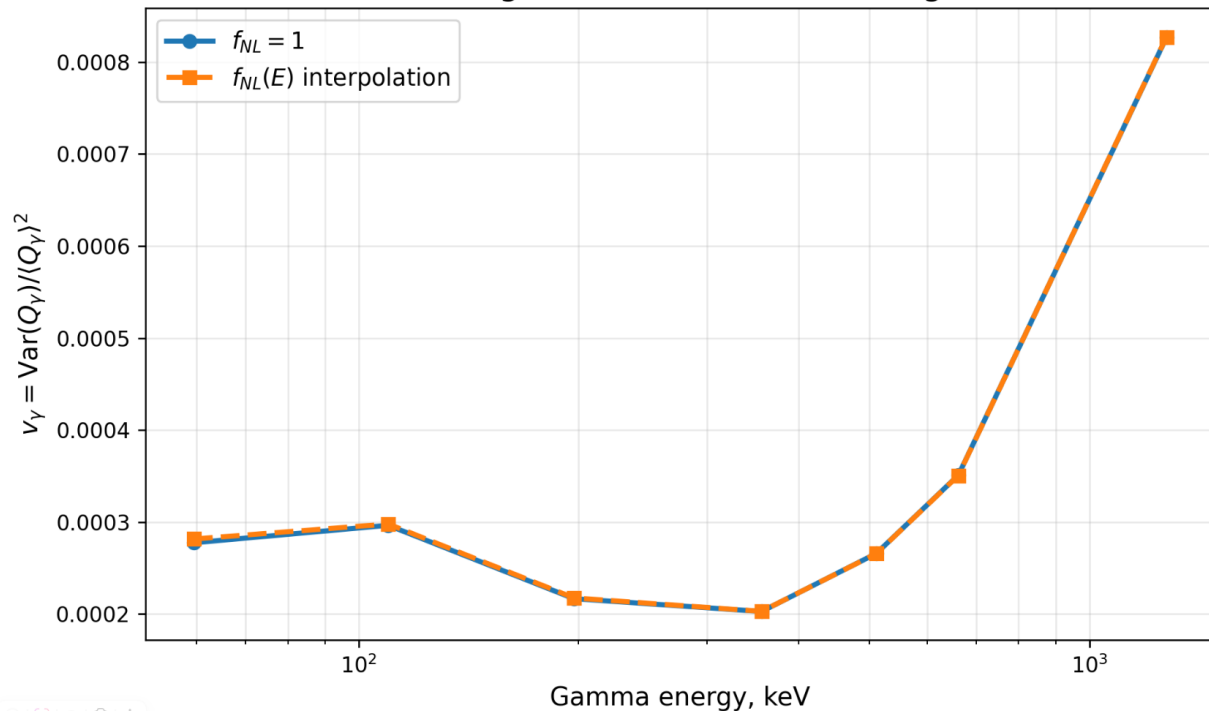
Использовались энергии в диапазоне от 59.5 до 1274.6 КэВ [2].



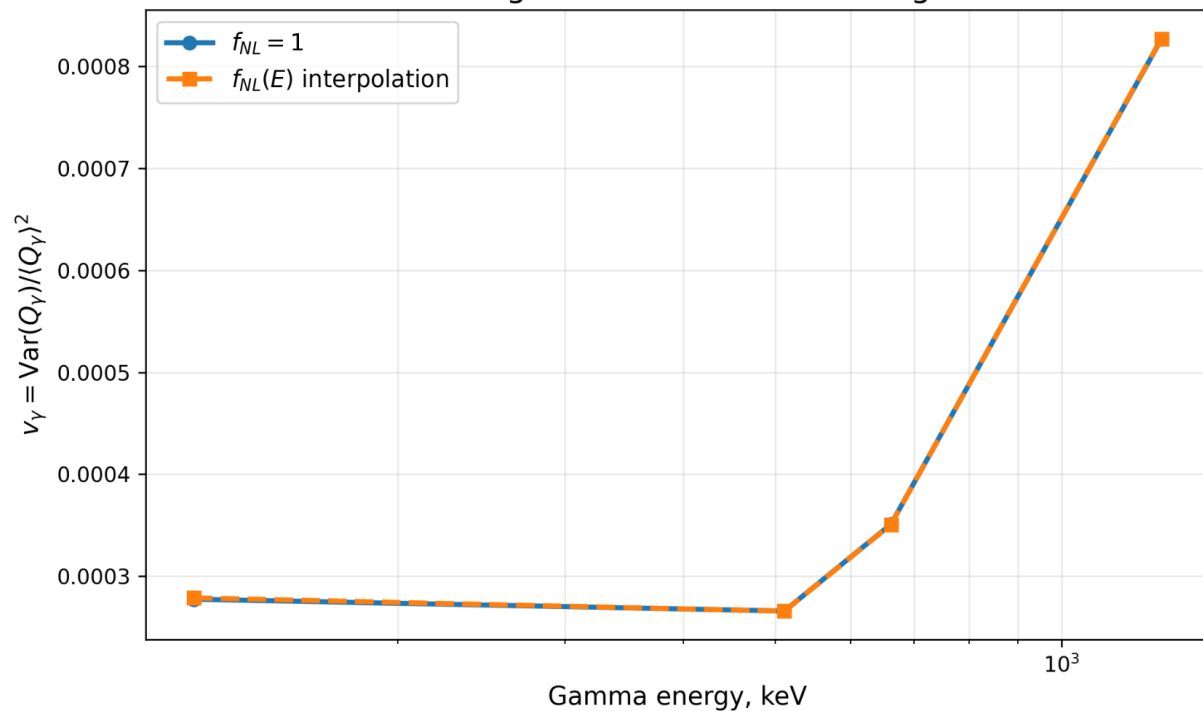
СВЕТОВЫХОД ДЛЯ **electronic recoils** в жидком аргоне

ДЛЯ НАС ВАЖНА ИМЕННО КРАСНАЯ ПУНКТИРНАЯ КРИВАЯ **0 V/CM** ТАК КАК КАЛИБРОВКИ ВЫПОЛНЯЮТСЯ ПРИ ОТСУТСТВИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Geant4 gamma term: Kimura energies



Geant4 gamma term: DS-10 energies



МЫ СРАВНИЛИ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ С ЛИНЕЙНЫМ СВЕТОВОХОДОМ И НЕЛИНЕЙНЫМ СВЕТОВОХОДОМ .В ОБОИХ СЛУЧАЯХ РАССЧИТЫВАЛИ

$$v_\gamma = \frac{\text{VAR}(Q_\gamma)}{\langle Q_\gamma \rangle^2}.$$

ПОЛУЧИЛОСЬ, ЧТО ДВЕ КРИВЫЕ ПОЧТИ СОВПАДАЮТ. ЗНАЧИТ, В НАШЕЙ РЕАЛИЗАЦИИ НЕЛИНЕЙНОСТЬ СВЕТОВОХОДА ДАЁТ ОЧЕНЬ МАЛОЕ ИЗМЕНЕНИЕ v_γ .ТЕОРЕТИЧЕСКИ ЭТО ПРОВЕРЯЕТ ИДЕЮ, ЧТО ГАММА-СИГНАЛ СКЛАДЫВАЕТСЯ ИЗ ВКЛАДОВ ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ, А СВЕТОВОХОД ЗАДАЁТСЯ ЧЕРЕЗ $Q(E) = LY \cdot E \cdot f_{NL}(E)$.

Сравнение с ARIS/DarkSide

В работе P. Agnes et al., Phys. Rev. D 97, 112005 (2018) был исследован отклик жидкого аргона на ER и NR.

в пределах 1.6% световыход линейный для энергий гамма-квантов в рассматриваемом диапазоне 40–511 КэВ.

Наш результат по DEAP-3600:

$$\nu_{\text{int}} = (4.9 \pm 0.7) \cdot 10^{-5}$$

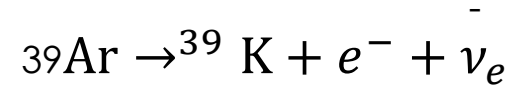
$$R_{\text{int}}(1 \text{ МэВ}) \approx (0.70 \pm 0.05) \%$$

Вывод:

С помощью приблизительного моделирования сделан вывод что нелинейный световыход не вносит вклада в энергетическое разрешение сцинтилляционного сигнала для жидкого аргона

DEAP-3600

DEAP-3600 измерял удельную активность β -распада ^{39}Ar в атмосферном аргоне:



Они очень точно измерили, сколько распадов ^{39}Ar происходит в 1 кг атмосферного аргона за секунду. DEAP-3600 использовал около 3269 ± 24 кг жидкого аргона и 167 времена экспозиции набора данных. Этот источник использовался для калибровки детектора

Поскольку калибровки проводились на электронах, у нас есть возможность оценить собственное разрешение жидкого аргона используя калибровочные данные на электронах. DEAP-3600 даёт параметризацию энергетического отклика жидкого аргона:

$$\sigma(PE) = \sqrt{p_3 PE + p_4 PE^2}$$

Отсюда:

$$v(PE) = \frac{\sigma^2}{PE^2} = \frac{p_3}{PE} + p_4$$

оценка вклада собственного разрешения

Сравниваем: $v_{DEAP}(Q) = \frac{p_3}{Q} + p_4$ с моделью $v(Q) = \frac{1+v_1}{Q} + v_P + (1 + v_P) \frac{Q_1}{Q} v_{1int}$

В приближении:

$v_P = p_4, v_1 = 0,35 \pm 0.05$ вариация одноэлектронного спектра

получаем:

$v_{1int} \approx (4.9 \pm 0.7) \cdot 10^{-5}$ То есть электронный вклад CR при 1 MeV:

$$R_{int}(1 \text{ MeV}) = \sqrt{v_{1int}} \approx 0.00697 \approx (0.7 \pm 0.05)\%$$

Из параметризации энергетического разрешения DEAP-3600 была получена оценка электронного intrinsic-вклада $v_{1int} \approx (4.9 \pm 0.7) \cdot 10^{-5}$.

С помощью приблизительного моделирования сделан вывод что нелинейный световыход дает очень малое изменение дисперсии

ИСТОЧНИКИ

1. O. Smirnov, *Intrinsic Resolution of Organic Scintillators*, arXiv:2506.03208, 2025.[1]
2. M. Kimura et al., *Liquid argon scintillation response to electronic recoils between 2.8–1275 keV in a high light yield single-phase detector*, *Phys. Rev. D* 102, 092008, 2020.[2]
3. P. Adhikari et al. (DEAP Collaboration), *Precision Measurement of the Specific Activity of ^{39}Ar in Atmospheric Argon with the DEAP-3600 Detector*, arXiv:2302.14639.
4. NEST Collaboration, *ER light yield in liquid argon, NEST light-yield curve*.
5. *Measurement of the liquid argon energy response to nuclear and electronic recoils* *PHYSICAL REVIEW D* 97, 112005 (2018)