

A photograph of a large, two-story yellow building with a white roof and white window frames. The building is surrounded by snow-covered ground and bare trees. The sky is blue with some light clouds. The text is overlaid on a semi-transparent white box.

Собственное энергетическое разрешение органических сцинтилляторов

Смирнов О.Ю. (ЛЯП)

Научно-методический семинар

30 января 2025 г.

О чём речь?

- Собственное энергетическое разрешение сцинтиллятора для фиксированной энергии E определяется как предельное энергетическое разрешение при регистрации 100% фотонов.
- Удобно работать с относительной вариацией:

$$v(N_{ph}(E)) = \frac{\sigma_{N_{ph}}^2}{N_{ph}^2} = R(E)^2$$

- Если количество фотонов генерируется по нормальному закону, то, естественно:

$$v(N_{ph}(E)) = \frac{1}{N_{ph}}$$

- В реальном сцинтилляторе $v(N_{ph})$ зависит от типа частицы и, как правило,

$$v(N_{ph}(E)) > \frac{1}{N_{ph}}$$

- Уширение сцинтилляционной линии обычно связывают с нелинейностью световыхода и генерацией δ -электронов.

АЗЫ

- Относительная вариация сигнала на выходе каскадного процесса:
- $$v(X) = v(X_1) + \frac{v(X_2)}{X_1} + \frac{v(X_3)}{X_1 \cdot X_2} + \dots + \frac{v(X_n)}{X_1 \cdot X_2 \cdot \dots \cdot X_{n-1}}$$
- $$\bar{X} = \bar{X}_1 \cdot \bar{X}_2 \cdot \dots \cdot \bar{X}_n$$
- Процесс регистрации сцинтилляционной вспышки ФЭУ можно рассматривать как каскад:
 - Излучение N_{ph} с относительной вариацией $v(N_{ph})$
 - Вероятность регистрации отдельного фотона p с относительной вариацией $v(p) = \frac{1-p}{p}$
 - Процесс регистрации фотоэлектрона ФЭУ с коэффициентом электронного умножения M , вариация одноэлектронного спектра $v(M) = v_1$

Тогда:

$$\bar{Q} = \bar{N}_{ph} \cdot p \cdot \bar{M}$$

$$v(Q) = v(N_{ph}) + \frac{1-p}{N_{ph}p} + \frac{v_1}{N_{ph}p} = \left(v(N_{ph}) - \frac{1}{N_{ph}} \right) + \frac{1+v_1}{N_{ph}p}$$

Удобно измерять полный анодный сигнал в единицах ф.э., то есть, положить $\bar{M} = 1$. Тогда

$$v(Q) = \left[v(N_{ph}) - \frac{1}{N_{ph}} \right] + \frac{1+v_1}{Q}$$

Непостоянная вероятность регистрации фотона (PhDE)

- Предполагалась фиксированная вероятность p . В реальном детекторе есть много факторов, приводящих к флуктуациям вероятности детектирования p : геометрия, неоднородность фотокатода, зависимость от угла падения и т.п.
- Положим, что в зависимости от факторов индивидуальные вероятности p_i проявляются с весами w_i ; среднее значение - p и относительная вариация величин p_i составляет $v(p)$.
- Для каждого из p_i работает полученная ранее формула. Вариацию сигнала (ф.э.) можно получить, взвесив среднеквадратичные значения и вычитая квадрат среднего:

$$\sigma^2(Q) = \sum_i w_i \left(\left[v(N_{ph}) - \frac{1}{N_{ph}} \right] Q_i^2 + (1 + v_1) Q_i + Q_i^2 \right) - Q^2$$

Здесь

$$Q_i = \frac{p_i}{p} Q$$

Тогда $\sum_i w_i Q_i = Q$ и $\sum_i w_i Q_i^2 = Q^2(1 + v(p))$, и для $v(Q)$ получим:

$$v(Q) = v(p) + \left[v(N_{ph}) - \frac{1}{N_{ph}} \right] (1 + v(p)) + \frac{1 + v_1}{Q}$$

Феноменологическая модель для описания вклада собственного энергетического разрешения

- Вклад CP : $\left[v(N_{ph}) - \frac{1}{N_{ph}} \right] (1 + v(p))$ - пользоваться неудобно, так как в выражении входит N_{ph} , а не Q
- Если предположить, что CP для двух электронов со световыходом N_{ph1} и N_{ph2} соответствует CP для электрона со световыходом $N = N_{ph1} + N_{ph2}$, то CP для электрона с произвольным световыходом можно записать:
- $\sigma_{N_{ph}}^2(E) \approx \frac{N_{ph}(E)}{N_{ph}(1)} \cdot \sigma_{N_{ph}}^2(1)$
- И относительная вариация составит:
- $v(N_{ph}) = \frac{\sigma_{N_{ph}}^2(E)}{N_{ph}^2(E)} = \frac{1}{N_{ph}(E)} \cdot \frac{\sigma_{N_{ph}}^2(1)}{N_{ph}(1)} = \frac{N_{ph}(1)}{N_{ph}(E)} \cdot \frac{\sigma_{N_{ph}}^2(1)}{N_{ph}^2(1)} = \frac{N_{ph}(1)}{N_{ph}(E)} \cdot \frac{N_{ph}(1) + \delta_{N_{ph}}^2(1)}{N_{ph}^2(1)} = \frac{1}{N_{ph}(E)} + \frac{N_{ph}(1)}{N_{ph}(E)} v_1^{int}$
- Учитывая нелинейность световыхода: $Q(E) = N_{ph}(E)p = LY \cdot E \cdot f_{NL}(E)$, получим
- $v(N_{ph}) = \frac{1}{N_{ph}(E)} + \frac{f_{NL}(1)}{f_{NL}(E)} v_1^{int}$ или $v(N_{ph}) = \frac{1}{N_{ph}(E)} + \frac{Q_1}{Q} v_1^{int}$

Итак

Относительная вариация сигнала сцинтилляционного детектора (с одним ФЭУ) в ф.э. составляет

$$v(Q) = v(p) + (1 + v(p)) \frac{Q_1}{Q} v_1^{int} + \frac{1 + v_1}{Q},$$

где

Q – среднее число регистрируемых ф.э.;

Q_1 – среднее число регистрируемых ф.э. для энергосвечения 1 МэВ (совпадает с LY, если $f_{NL}(1) = 1$);

$v(p)$ – относительная вариация вероятности регистрации ф.э.;

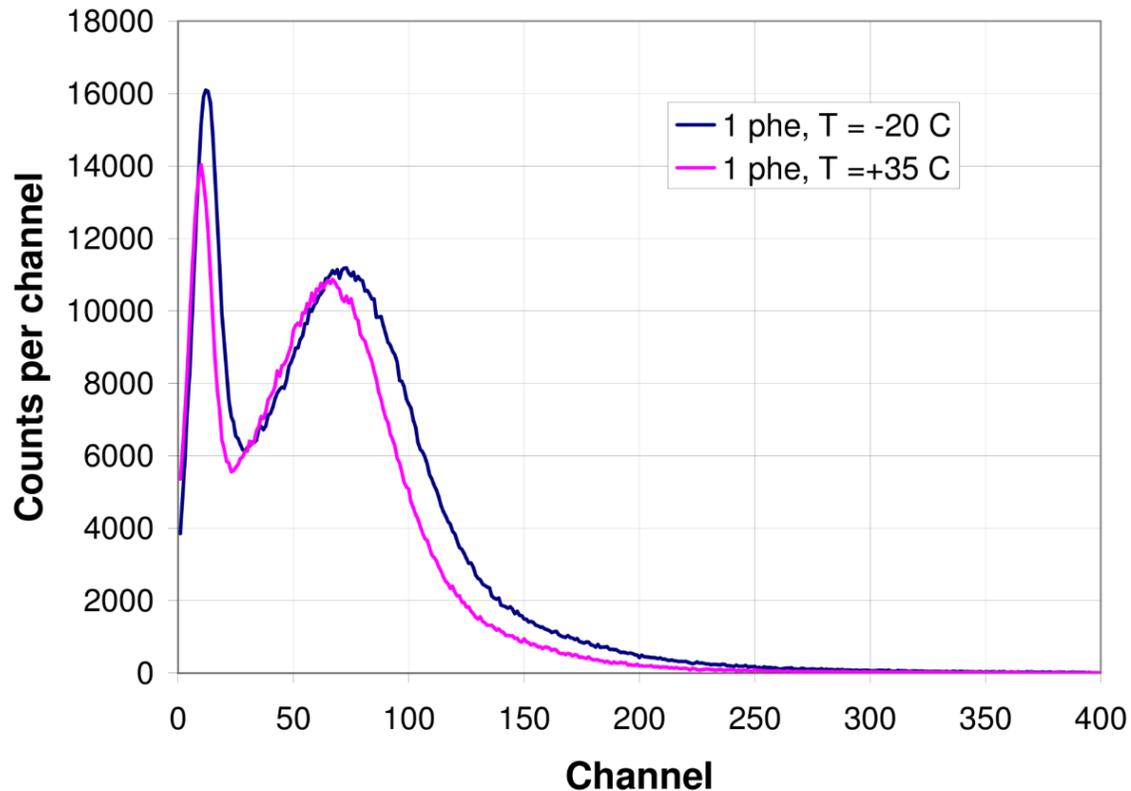
v_1^{int} – параметр, описывающий величину превышения относительной вариации СР над нормальной;

v_1 - относительная вариация одноэлектронного спектра.

Опущен возможный вклад темнового шума и предполагается несмещённая оценка количества ф.э.

Если истинное значение числа ф.э. смещено ($Q_{reg} = c \cdot Q_{true}$), то стат.член надо умножить на “с”.

Отклик ФЭУ



Измерения для Photonis XP5500 из C.Plettner, et al., "CaF₂(Eu): An "old" scintillator revisited". Journal of Instrumentation, 2013, 8, P06010.

- 1) Пик \neq среднему; на данной картинке разница составляет 3% ($\mu=63.0$ vs 61.1)
- 2) Вариация по всему спектру больше, чем вариация пика (квази-гауссова)
- 3) Отн. вариация пика $v_1=0,24$; вариация по представленному спектру $v=0,42$.
- 4) В спектре явно присутствует многоэлектронный вклад, поэтому прямые оценки смещены.

Связь параметров одноэлектронного спектра с откликом в случае малоинтенсивного источника

Одноэлектронный спектр обычно изучается в условиях слабой освещённости, вероятность срабатывания в одном событии связана со средним количеством ф.э. : $P(0) = e^{-\mu} = 1 - \frac{N_{ev}}{N_{Trig}}$

$$\bar{q} = \frac{\mu}{1 - e^{-\mu}} q_1 \cong \left(1 + \frac{\mu}{2}\right) q_1$$

$$v = \frac{1 - e^{-\mu}}{\mu} (1 + v_1) - e^{-\mu} \cong v_1 + \frac{\mu}{2} (1 - v_1)$$

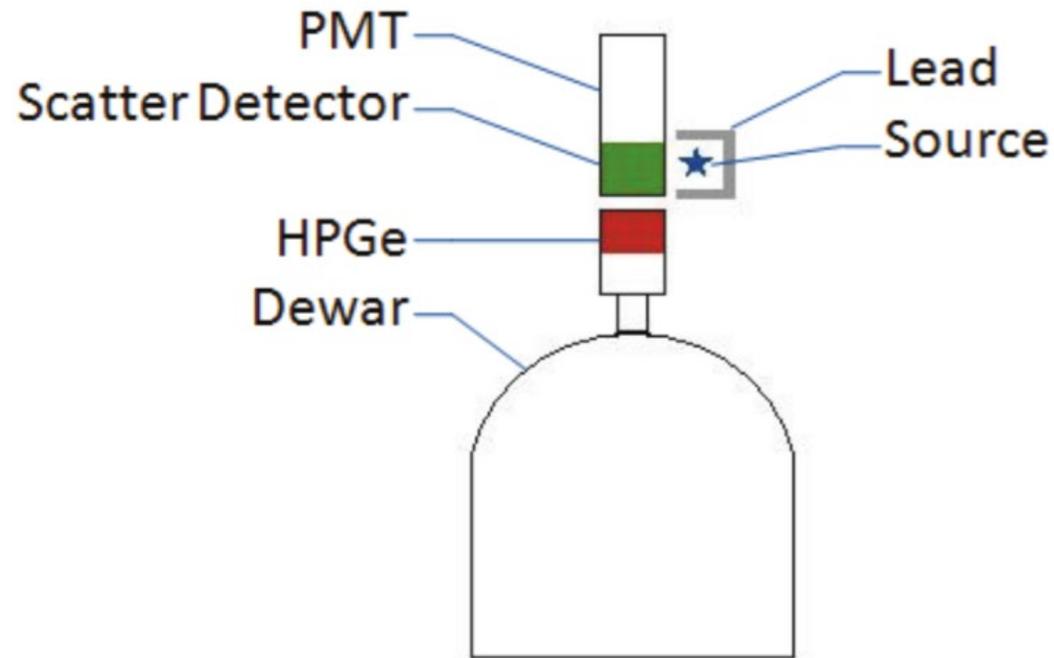
Для ETL9351 (Borexino):

$$v_1 = 0,34$$

Для $\mu = 0,1$ и порога $0,2$ ф.э.:

$$\langle q \rangle = 1,05 \text{ и } v = 0,37$$

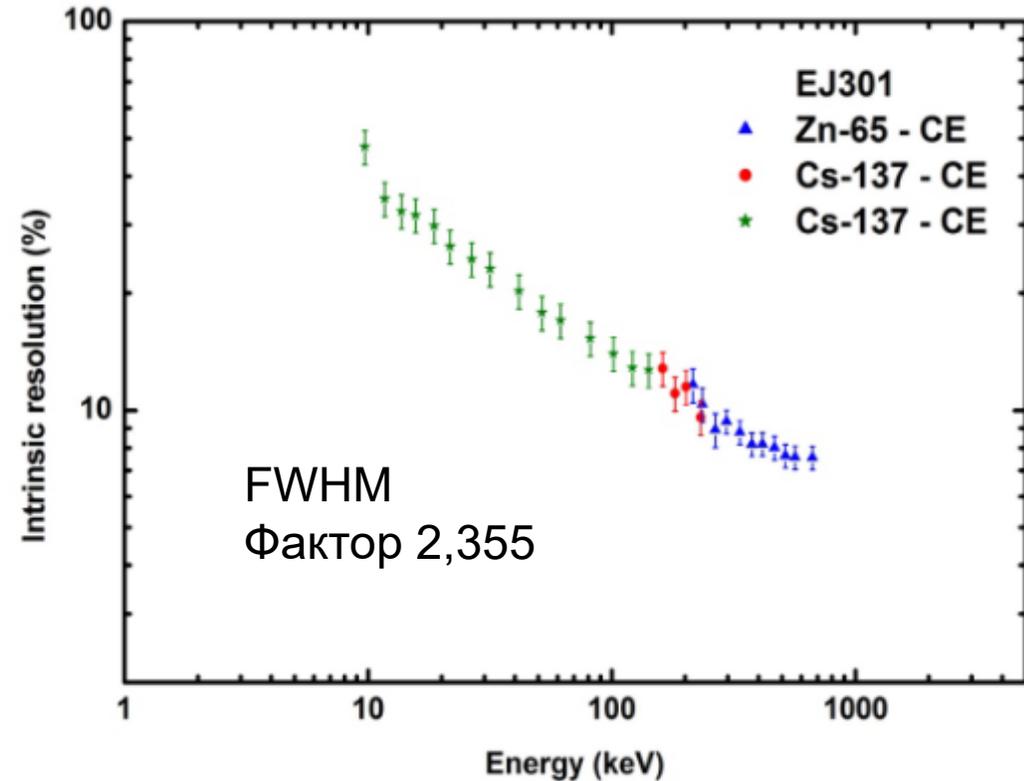
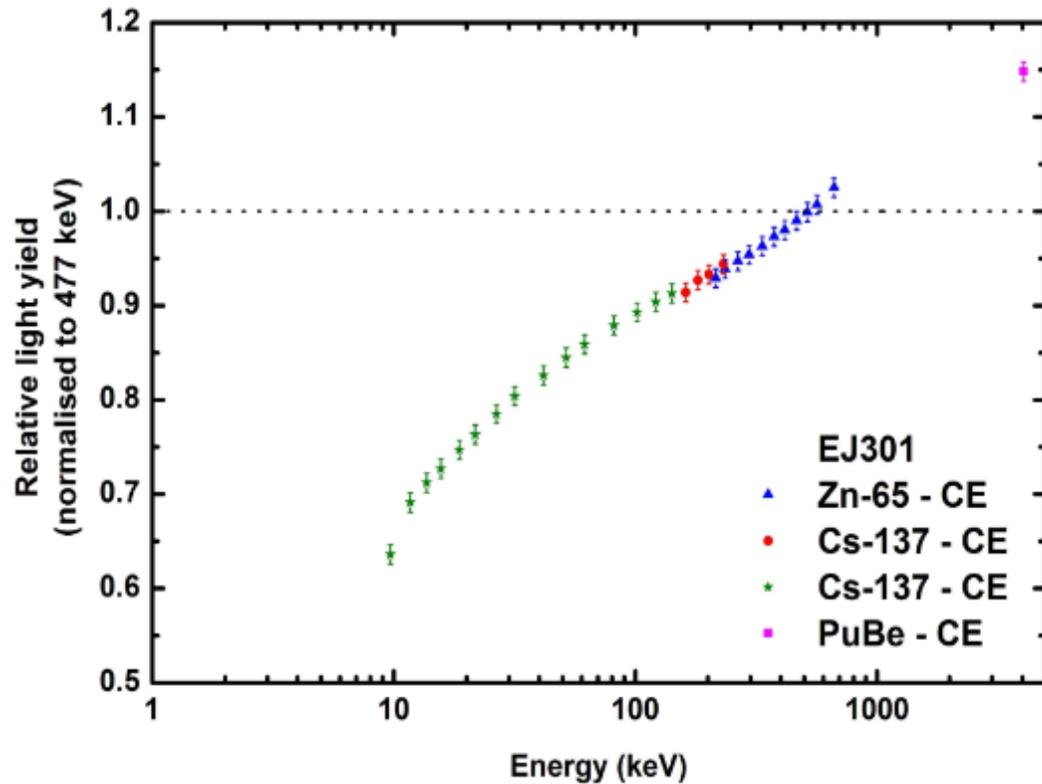
WACC – wide angle Compton coincidence technique



$$E_{scatter} = E_{\gamma} - E_{HPGe}$$

Измерения с ЖС EJ301

L.~Swiderski et al., "Electron response of some low-Z scintillators in wide energy range", 2012 JINST 7 P06011.



WACC спектрометр

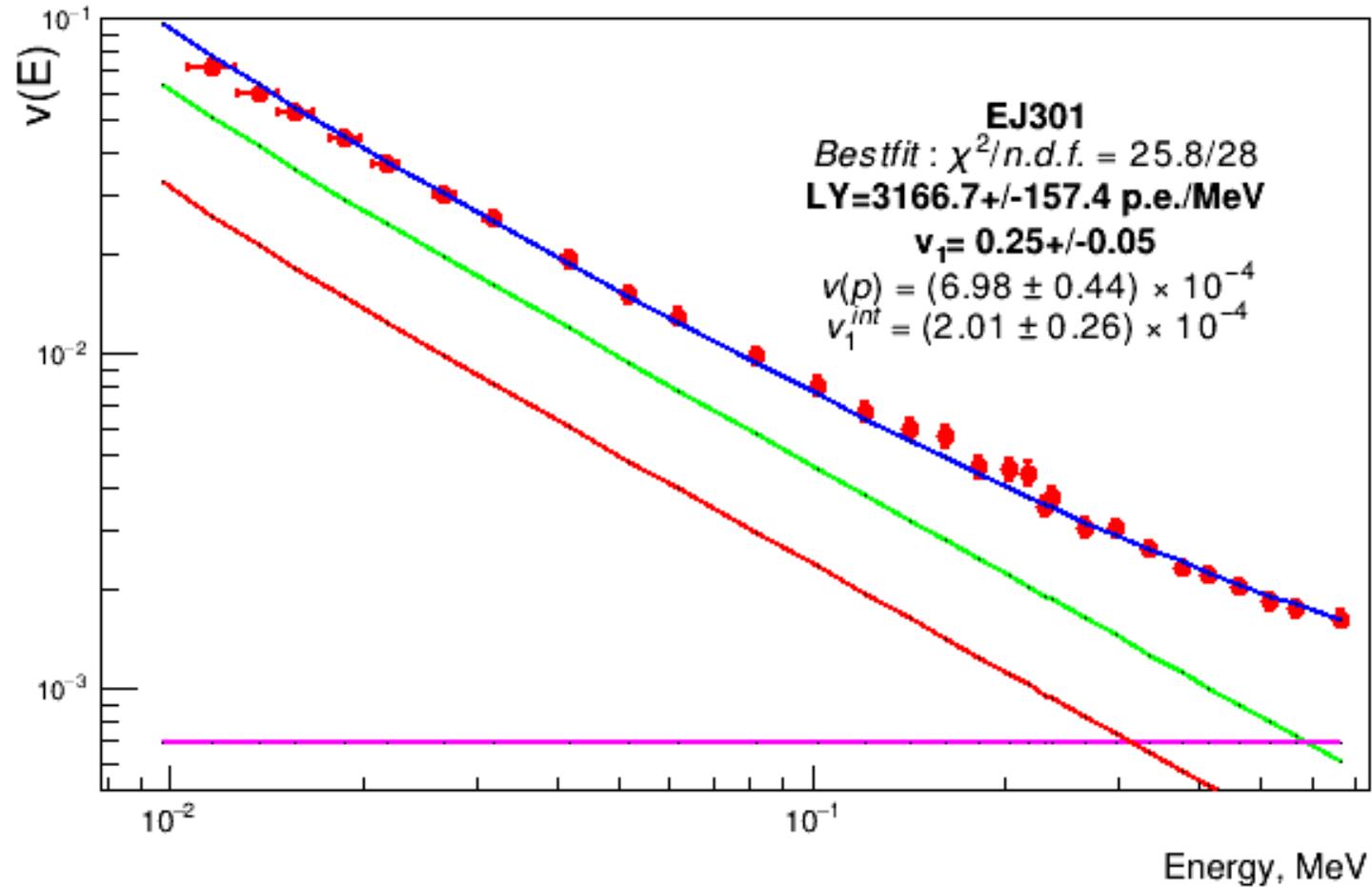
2" (диам)× 2" EJ301(Scionix Holland B.V.) в Al капсуле с прозрачным окном.

ФЭУ: XP5212B

Несколько комментариев

- **Нелинейность отклика** нужна исключительно для того, чтобы вернуть измерения на шкалу ф.э. ($Q(E) = LY \cdot E \cdot f_{NL}(E)$)
- Если бы данные были представлены на шкале ф.э., то для определения вклада собственного разрешения функция нелинейности была бы не нужна
- Авторы сознательно пренебрегли возможной неоднородностью светосбора δ_p^2 при представлении своих данных (этот факт подчёркивается в статье), то есть вариация сигнала в измерениях представляет собой сумму постоянной по энергии вариации светосбора и зависящего от энергии вклада собственного разрешения. Поэтому для удобства анализа я восстановил значения для полной вариации сигнала с использованием значений параметров из статьи $v_1 = 0.10$ и $LY=2850$ ф.э./МэВ:
- $$v_{full} = \left(\frac{R_{int}}{2,355} \right)^2 + \frac{1,1}{2850 \cdot f_{NL}(E) \cdot E}$$
- Значение $v_1 = 0.10$ приведено без ошибок и без обсуждения возможной систематики
- Значение $LY=(2850 \pm 150)$ ф.э./МэВ - приводится без деталей анализа

EJ301



Ошибки (7,5 и 10% на оригинальной картинке) уменьшены (фактор 0,7), чтобы получить приведённое значение $\chi^2 \approx 1$

Систематика

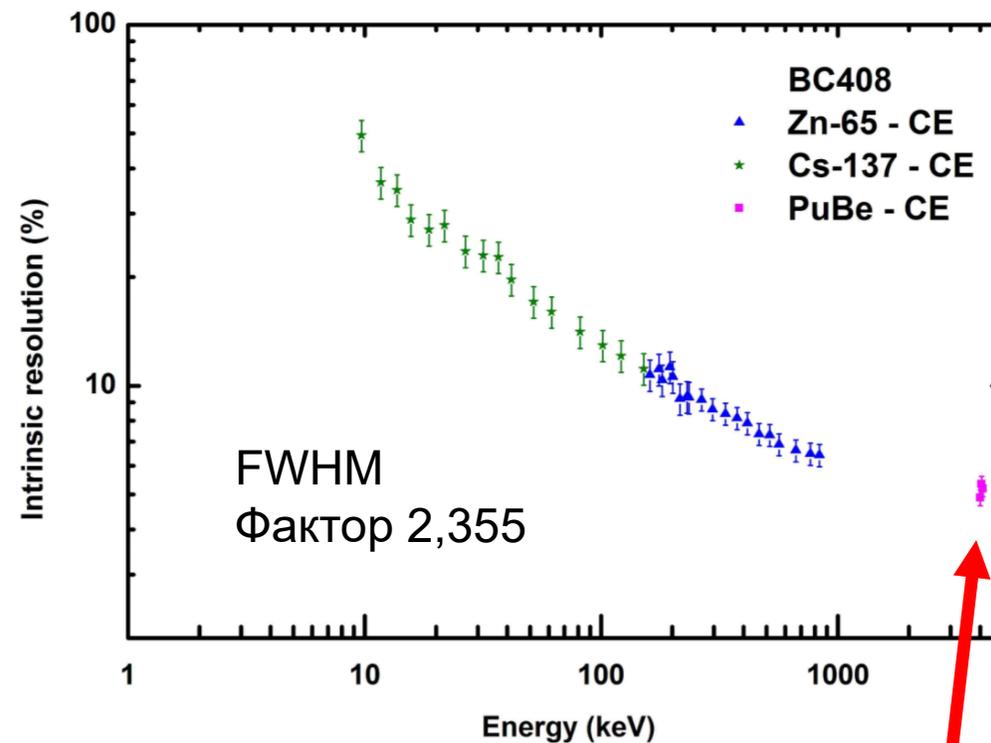
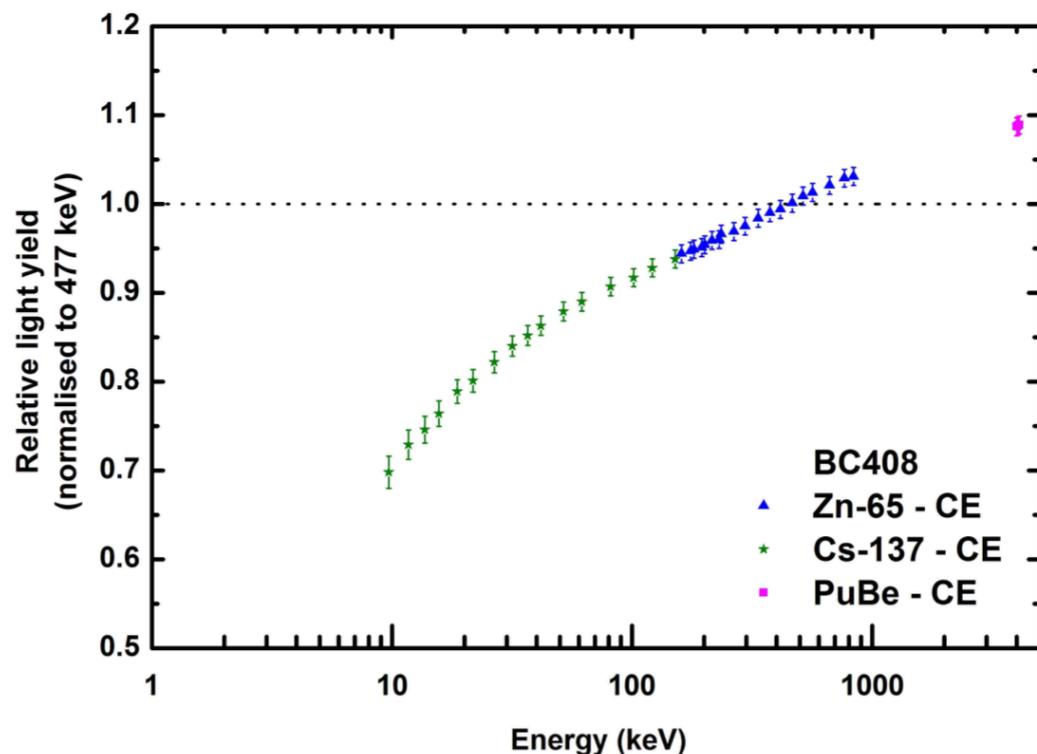
- ФЭУ: ХР5212В
- В статьях авторов оценка параметров одноэлектронного спектра всегда сделана из подгонки пика нормальным распределением
- Из формы спектра очевидно, что c заметно меньше 1, а значение $v_1 = 0.10$ недооценено
- Параметр v_1^{int} линейно зависит от c и v_1 (100% корреляция), значение χ^2 при этом не меняется.

$$v_1^{int}(\text{EJ301}) = (2.21 - 3.8 \cdot (c - 1) - 3.5 \cdot (v_1 - 0.1)) \times 10^{-4}$$

- Для $v(p)=0$ $\chi^2 = 276,9/29$, что исключает отсутствие данного члена
- Отсутствие вклада собственного разрешения соответствует нереалистичным значениям $v_1 = 0.73$ или $c = 1.58$.
- Без детального анализа одноэлектронного спектра численная оценка систематики затруднена. Но, поскольку $c < 1$ а $v_1 > 0.1$, то переоценка параметров не приведёт к значительному смещению значения v_1^{int} . Так, для реалистичных значений $v_1 = 0.25$ и $c = 1.58$.

Измерения с ПС ВС408

L.~Swiderski et al., "Electron response of some low-Z scintillators in wide energy range", 2012 JINST 7 P06011.

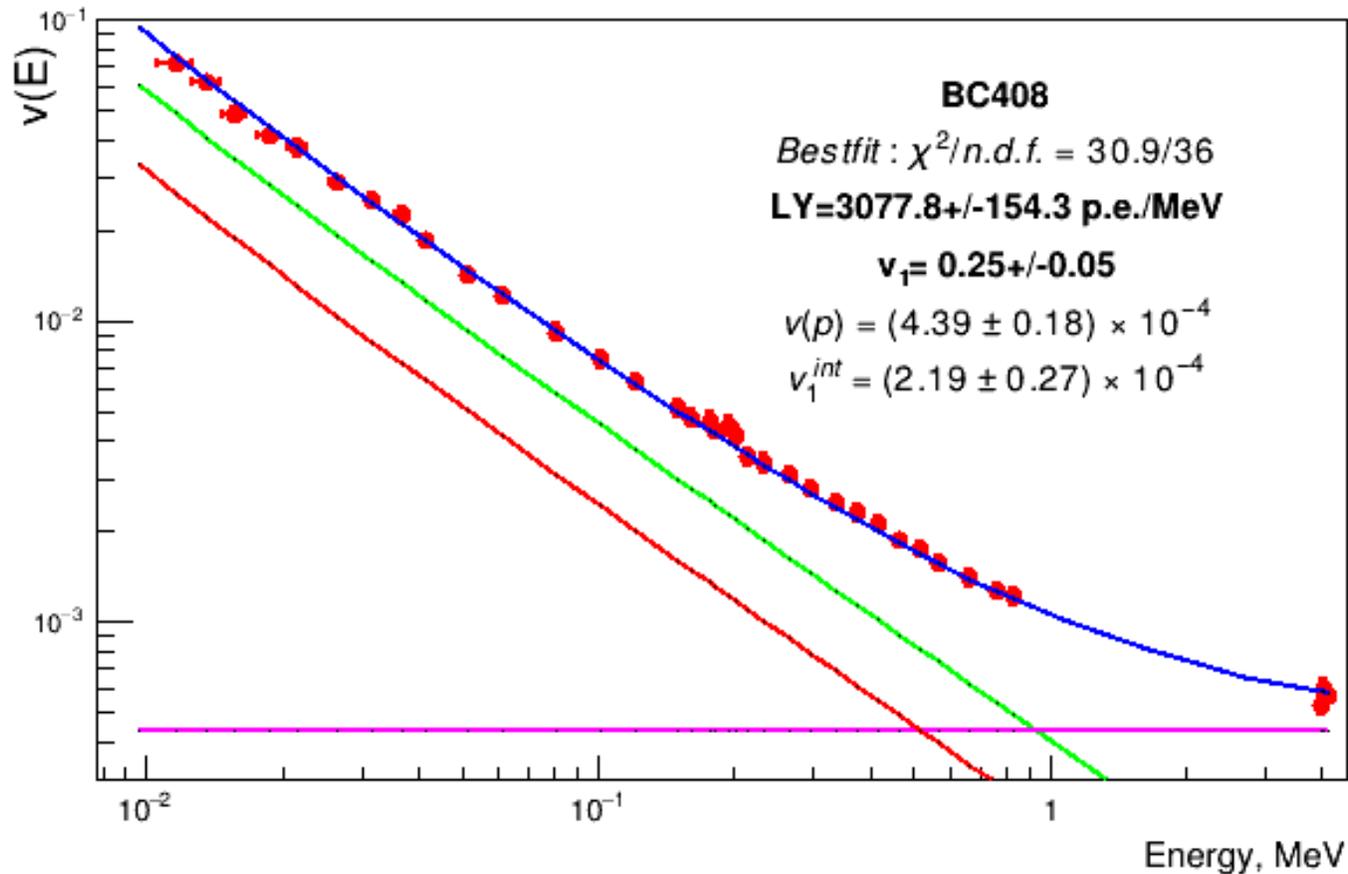


WACC спектрометр
40мм диам x 50мм
ФЭУ XP5500B

Комментарии те же

4 МэВ

Пластиковый сцинтиллятор BC408



Восстановлены значения для полной вариации сигнала с использованием значений параметров из статьи. Использовал “волшебное” значение $v_1 = 0.10$ (в статье не указано, но в другой статье авторов цитируется как типичное для современных ФЭУ) LY=(2770 \pm 150) ф.э./МэВ

Ошибки (7,5 и 10% на оригинальной картинке) уменьшены (фактор 0,7), чтобы получить приведённое значение $\chi^2 \approx 1$

Систематика

- ФЭУ: ХР5500В
- В статьях авторов оценка параметров одноэлектронного спектра всегда сделана из подгонки пика нормальным распределением
- Из формы спектра очевидно, что c заметно меньше 1 и значение $v_1 = 0.10$ недооценено
- Параметр v_1^{int} линейно зависит от c и v_1 (100% корреляция), значение χ^2 при этом не меняется.

$$v_1^{int}(\text{BC408}) = (2.10 - 3.9 \cdot (c - 1) - 3.5 \cdot (v_1 - 0.1)) \times 10^{-4}.$$

- Для $v(p)=0$ $\chi^2 = 622,3/37$, что исключает отсутствие данного члена
- Отсутствие вклада собственного разрешения соответствует нереалистичным значениям $v_1 = 0.76$ или $c = 1.59$.
- Без детального анализа одноэлектронного спектра численная оценка систематики затруднена. Но, поскольку $c < 1$ а $v_1 > 0.1$, то переоценка параметров не приведёт к значительному смещению значения v_1^{int}

Ещё по систематике, связанной с калибровкой ФЭУ

TABLE VII
PHOTOELECTRON NUMBER OF LSO CRYSTAL^{a)} MEASURED BY DIFFERENT METHODS WITH DIFFERENT PMTs

PMT	Blue sensitivity [μA/lm blue]	Single phe peak position [ch]		Phe number by single phe method [phe/MeV]		Phe number by PHR [phe/MeV]	Ratio of PHE numbers ^{b)}
		Dark noise	Light pulser	Dark noise	Light pulser		
XP2020Q	10.1	323±3	322±3	6150±100	6160±100	6290±200	0.98±0.05
XP20D0	13.2	287±3	294±3	8270±200	8100±200	8500±300	0.97±0.05
R2059	9.1	295±3	298±3	7900±200	7820±200	7070±300	1.12±0.05
R6231MOD	13.7	245±7	243±5	10900±400	11000±400	8500±300	1.28±0.08
XP5200	13.2	311.7±3	306.0±3	9700±300	9900±300	7500±300	1.29±0.06
XP5200-old	10.7	319±3	329±3	8050±200	7800±200	6850±200	1.18±0.05
XP5212	12.1	224±3	233±3	7100±150	6800±150	6800±200	1.04±0.05
XP5301 Clarity	14.6	214±3	237±3	11800±300	10700±300	8400±300 9050±300 ^{c)}	1.40±0.07 1.30±0.07 ^{c)}
XP5302	13.9	324±3	344±3	10500±300	9900±300	8800±300	1.19±0.05
R5320	8.9	310±3	309±3	5600±150	5600±150	4650±200	1.20±0.05
R9420	12.6	298±3	329±3	10600±300	9600±300	7400±200	1.43±0.08
R3998	undefined	208±5	214±3	7460±200	7240±200	7280±200	1.02±0.05

The data presented in Table VII lead to the conclusion that two independent effects are observed in modern photomultipliers. The first one suggests a different gain of the photomultiplier for the multi-photoelectron light pulses than that of the single photoelectron peak, and the second one is related to the shift of the single photoelectron peak.

$$Q_p = c \cdot Q_{true}$$

$$Q_{PHR} = \frac{1,1}{v}$$

$$\frac{Q_p}{Q_{PHR}} = \frac{c \cdot Q_{true}}{1,1} v =$$

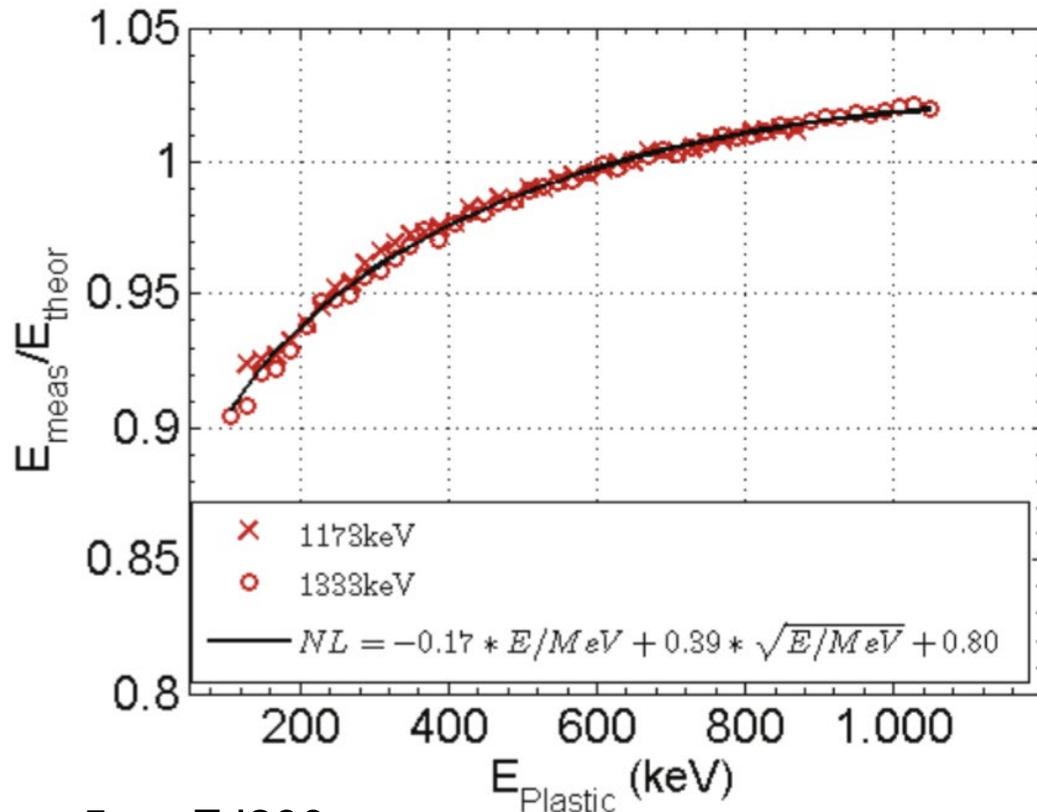
$$= \frac{c \cdot Q_{true}}{1,1} \left(\frac{1+v_1}{Q_{true}} + v(p) \right) =$$

$$= \frac{c \cdot (1+v_1)}{1,1} + \frac{c \cdot Q_{true}}{1,1} v(p)$$

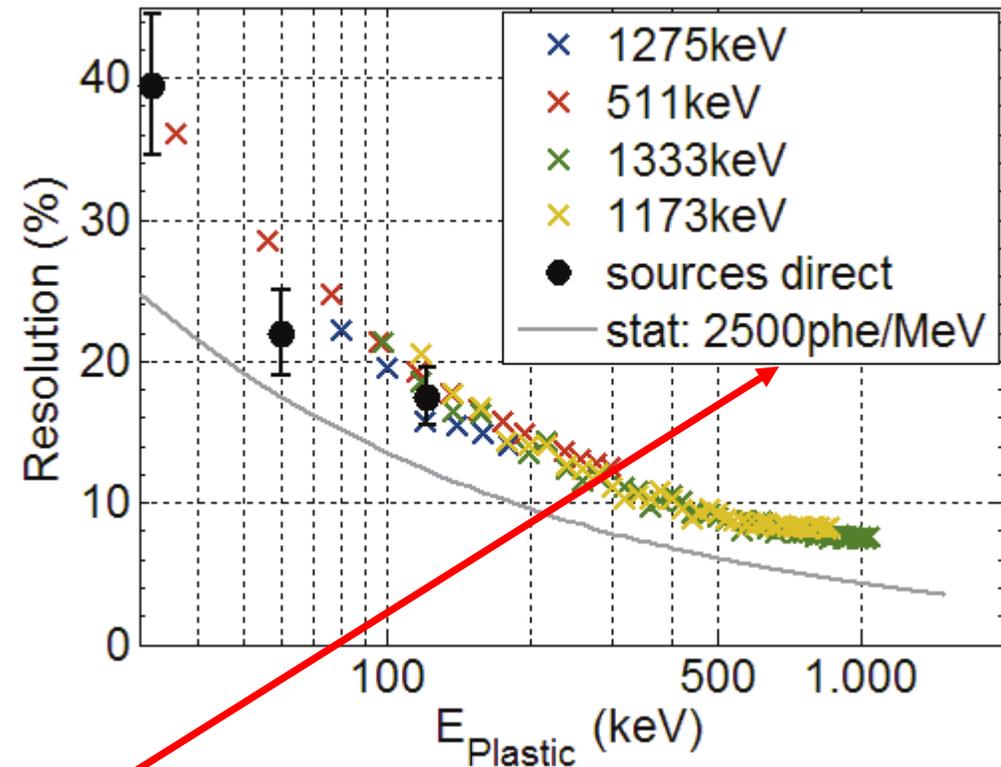
Таблица из статьи M.Moszynski et al., “Characterization of Scintillators by Modern Photomultipliers—A New Source of Errors”,
2010 IEEE Transactions on Nuclear Science 57(5):2886 - 2896

Измерения с ПС EJ200

- K. Roemer et al., "A technique for measuring the energy resolution of low-Z scintillators," 2009 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record (NSS/MIC), Orlando, FL, USA, 2009, pp. 6-11, doi: 10.1109/NSSMIC.2009.5401909.



Ø5 см×5 см EJ200
ФЭУ: Photonis XP5500



Просто какое-то число!

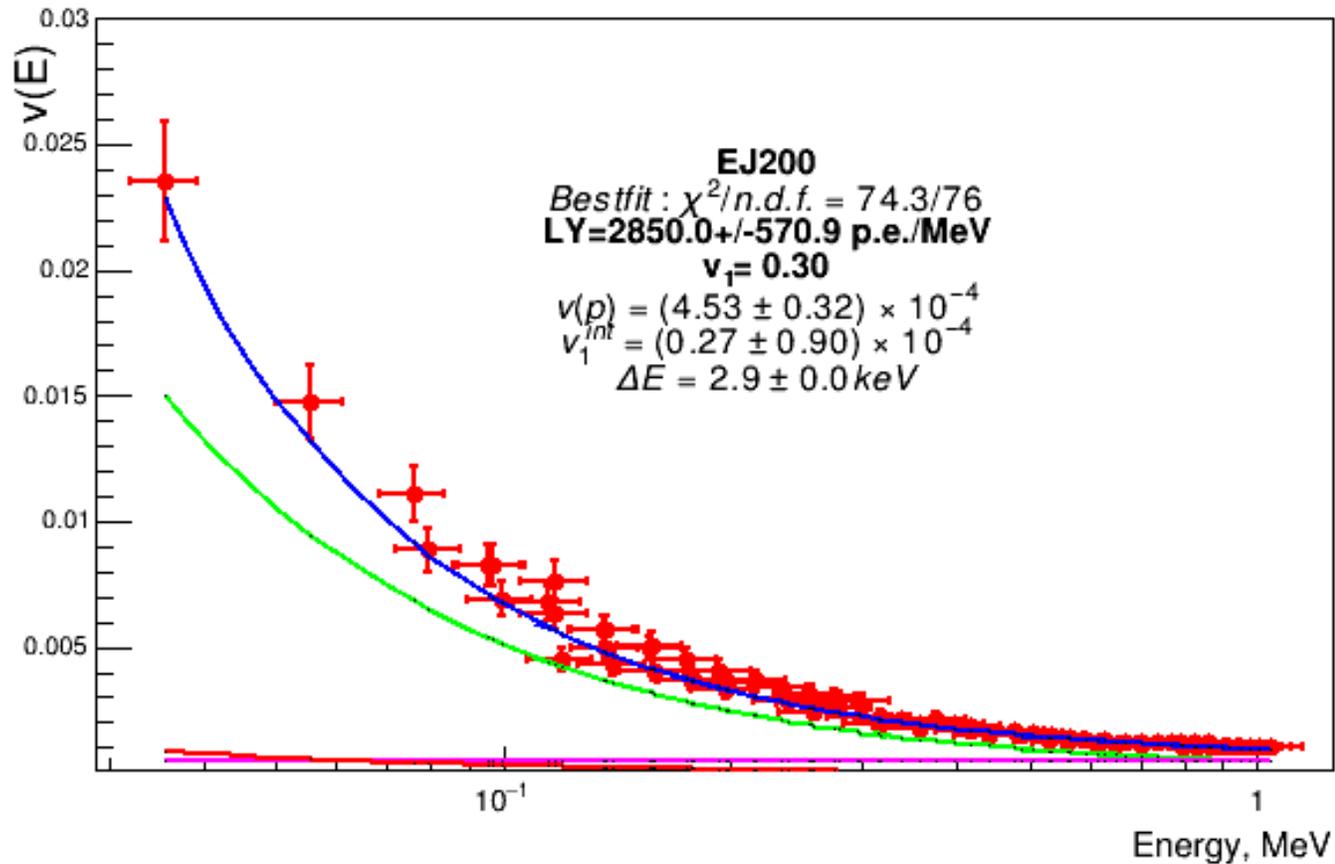
Подгонка

- 1) Первые две точки плохо ложатся на подгоночную кривую. Причина – немоноэнергетичность “пучка”, разброс энергий, ширина на HPGe- 10 кэВ. В подгоночную формулу добавлен соответствующий постоянный член:

$$\frac{1}{12} \left(\frac{\Delta E}{E} \right)^2$$

2) В статье вообще не обсуждается калибровка ФЭУ и параметр v_1 ; световой выход приведён только на картинке (без ошибок измерения). Для использовавшегося типа ФЭУ (XR5500) есть измерения в другой статье, параметр $v_1 \approx 0,3$. Световой выход в подгонке пришлось оставить свободным.

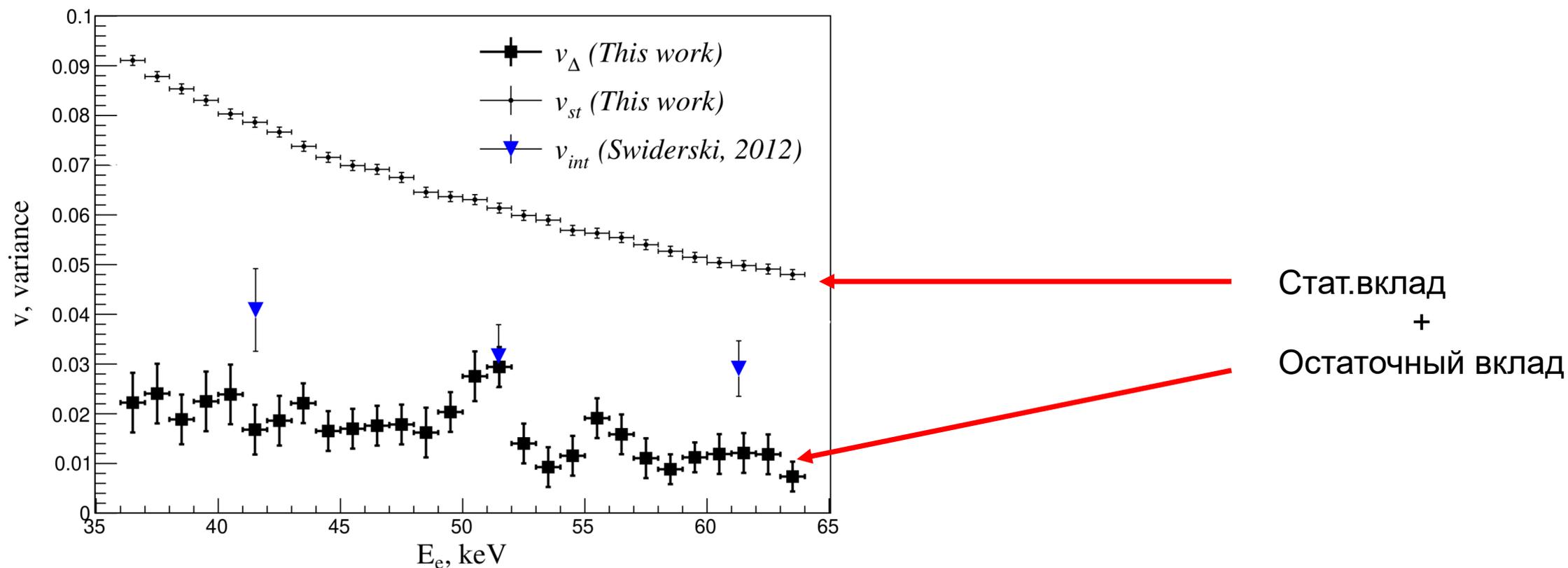
EJ200



Большие неопределённости
для световых выхода и v_1^{int}
 $v(p)$ – определяется достаточно
точно

Главный вывод: зависимость
вклада собственного
разрешения от энергии не
противоречит гипотезе $(\frac{1}{Q})$

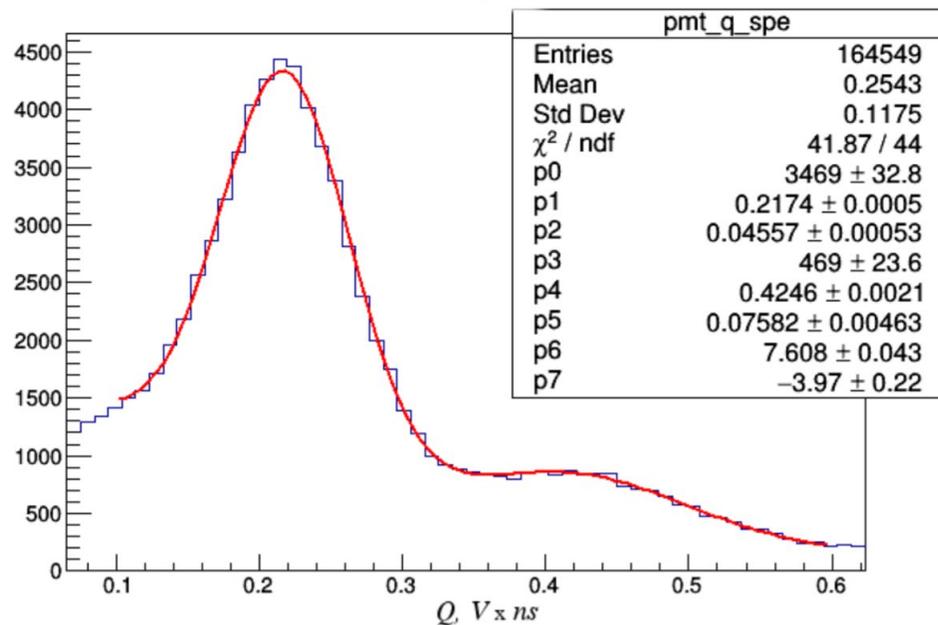
Измерение с ЖС на основе LAB



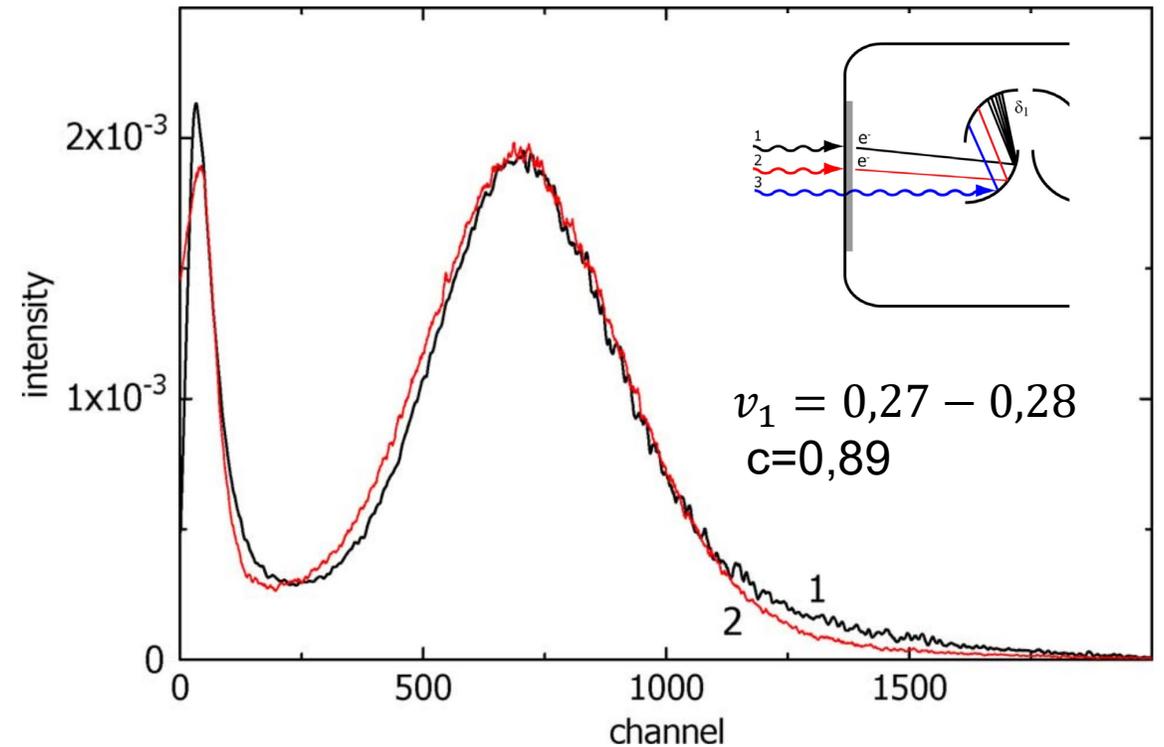
A. Formozov, PhD, "Search for Non-Standard Neutrino Interactions with large-volume liquid scintillator detectors", Milano, 2019

Одноэлектронный спектр

ФЭУ Hamamatsu R6231-100

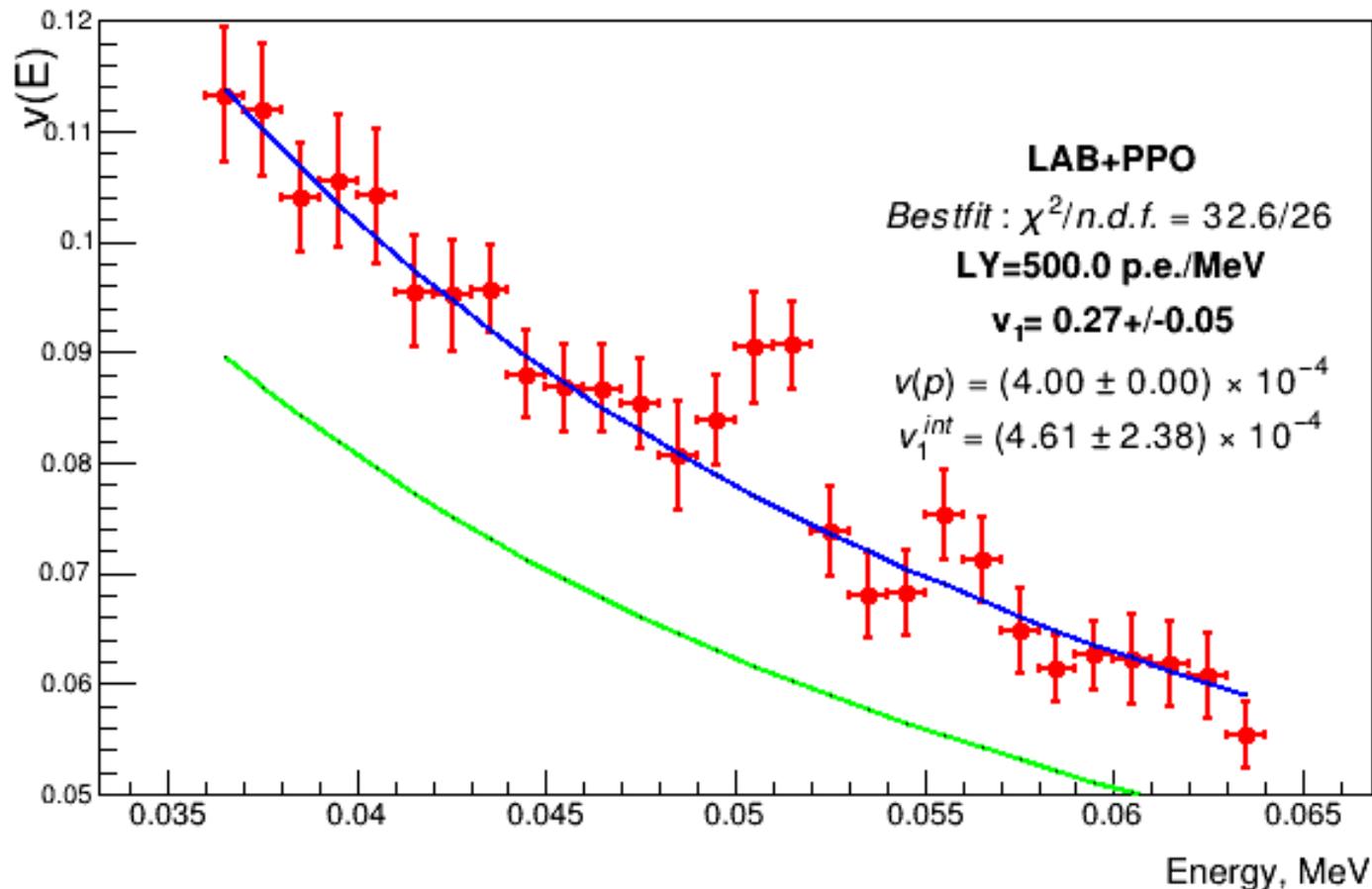


$\nu_1 = 0,05$
LY=450 ф.э./МэВ



de Haas J., "Methods for Accurate Measurement of the Response of Photomultiplier Tubes and Intensity of Light Pulses" IEEE Transactions on Nuclear Science, 2011, 58(3)

Результат подгонки



^{137}Cs (662 кэВ)

Разрешение HPGe детектора –
1,5 кэВ (0,2%)

Параметр оставлен свободным в
подгонке:

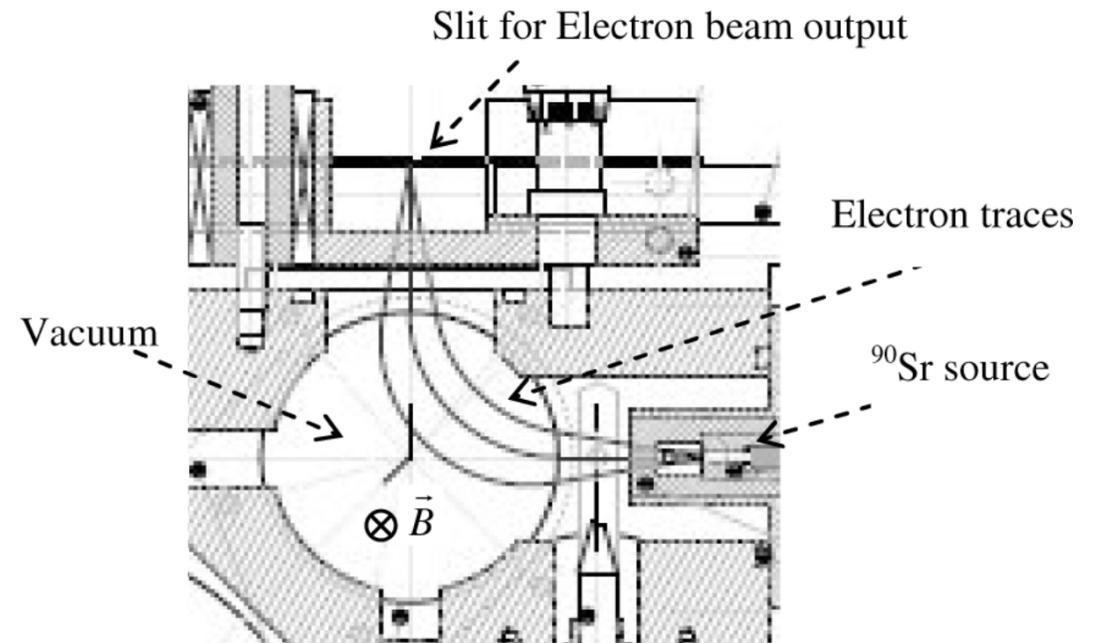
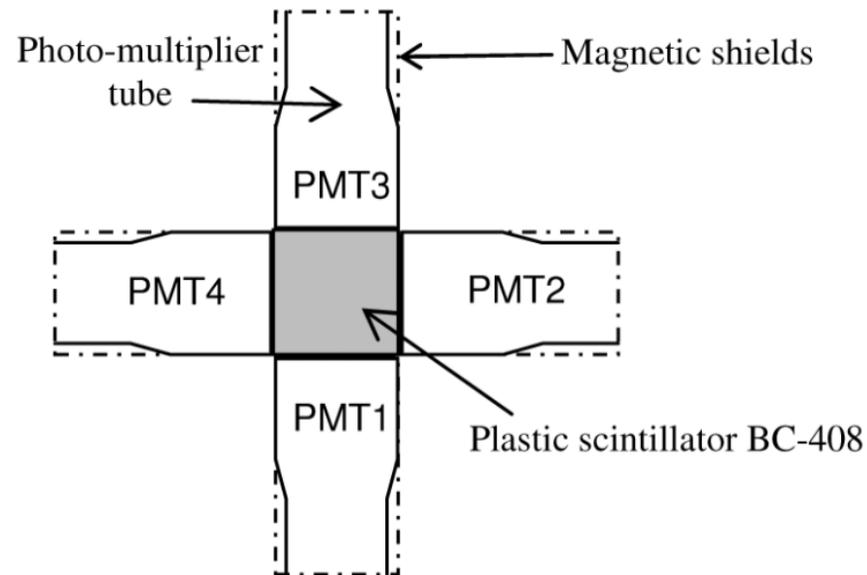
$$\sigma(E) = 3,2 \pm 1,6 \text{ кэВ}$$

Нет чувствительности к $v(p)$ в
используемом диапазоне энергий,
поэтому параметр фиксирован на
значении

$$v(p) = 4 \cdot 10^{-4}$$

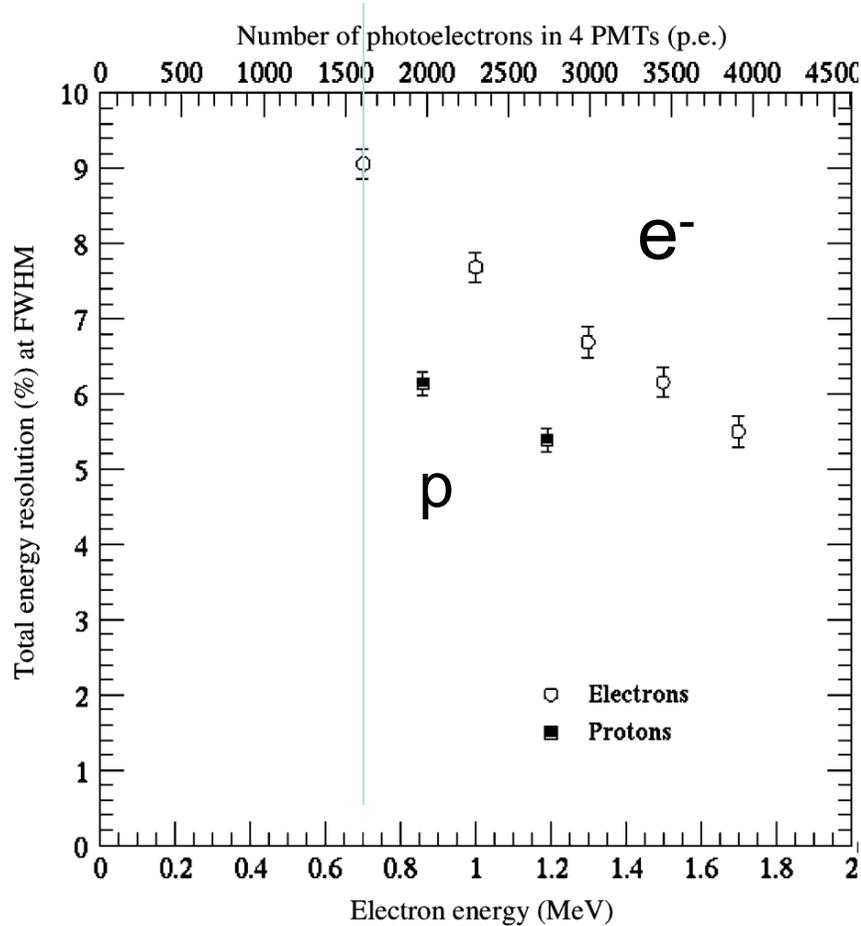
Ещё одно измерение с ПС ВС408

H. H. Vo et al., "Energy Resolution of Plastic Scintillation Detector for Beta Rays," in IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 55, no. 6, pp. 3717-3724, 2008

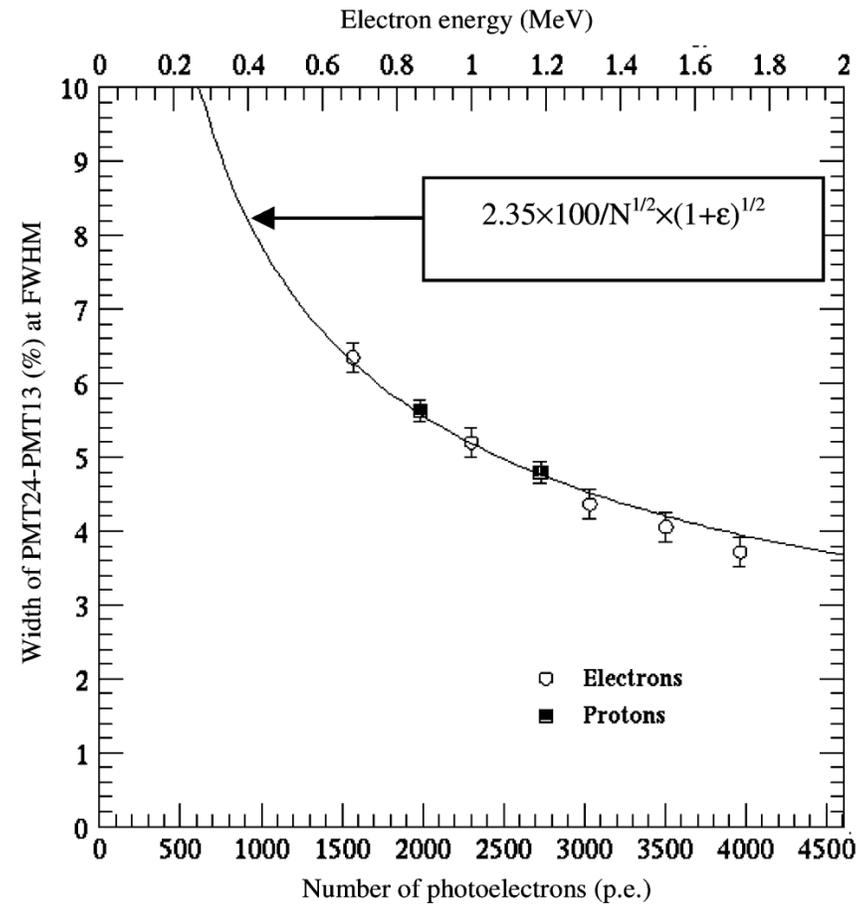


- ФЭУ: Hamamatsu R-6236-01

Измерения



$$R(Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4)$$

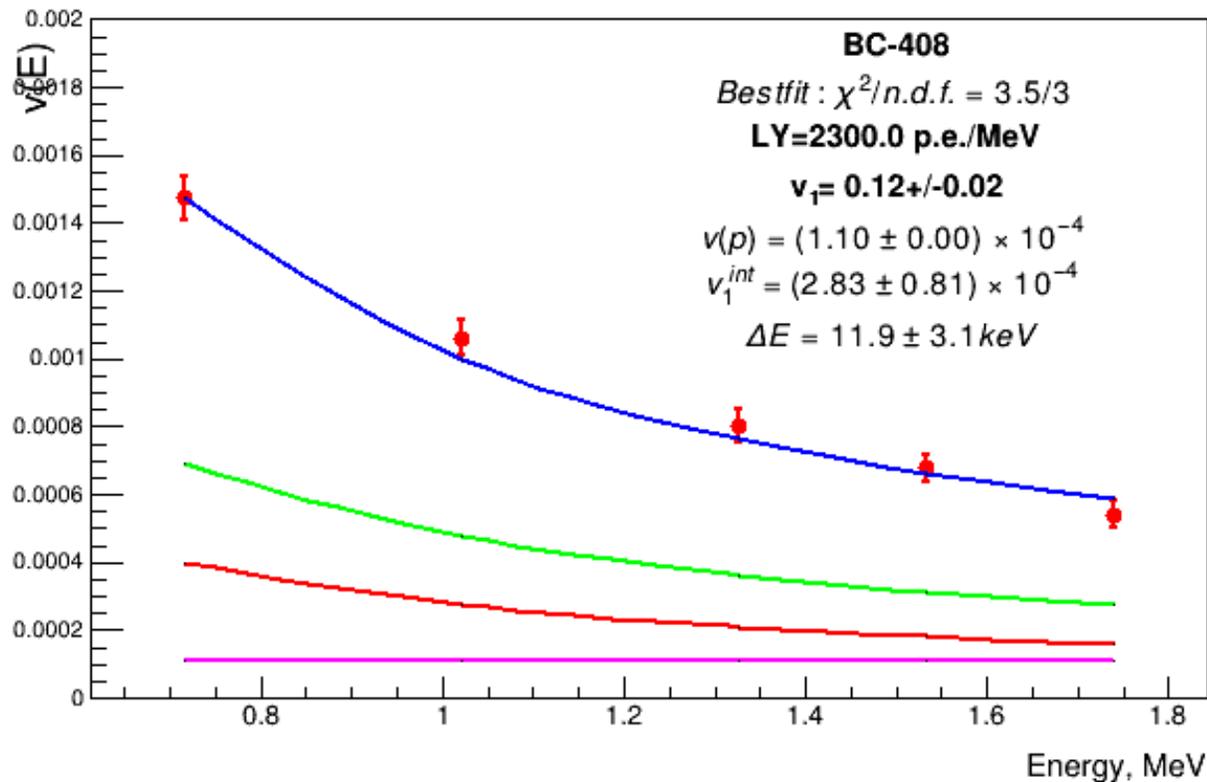


$$R((Q_1 + Q_3) - (Q_2 + Q_4))$$

Замечания

- Точное определение стат.части (отдельный фит – пара параметров LY и v_1)
- Хотя данные приведены на шкале ф.э., функция нелинейности не учитывалась.
- Подгонка стат.части даёт $v_1 = 0,125 \pm 0,021$ для LY=2300 ф.э./МэВ (для $v_1 = 0,27$ LY=2592±48 ф.э./МэВ, или $c=0,89$, как для R6231-100). Конкретные значения в данном случае не важны, так как стат.часть точно вычитается для любой комбинации подгоночных параметров.
- Неоднородность светосбора для схемы из четырех ФЭУ даёт вклад $v(p) = \frac{v_1(p)+v_2(p)+v_3(p)+v_4(p)}{4^2} = \frac{\overline{v(p)}}{4}$; использовалось значение $1,1 \times 10^{-4}$
- Надо учесть немоноэнергетичность пучка, в статье приводится для электронов ~1,8% FWHM @ 1 МэВ, или 7,6 кэВ 1σ ; для протонов – 1% или 4,2 кэВ 1σ .

Результаты подгонки для электронов



Ширина пучка 7,6 кэВ

Параметр оставлен свободным в подгонке:

$$\sigma(E) = 11,9 \pm 3,0 \text{ кэВ}$$

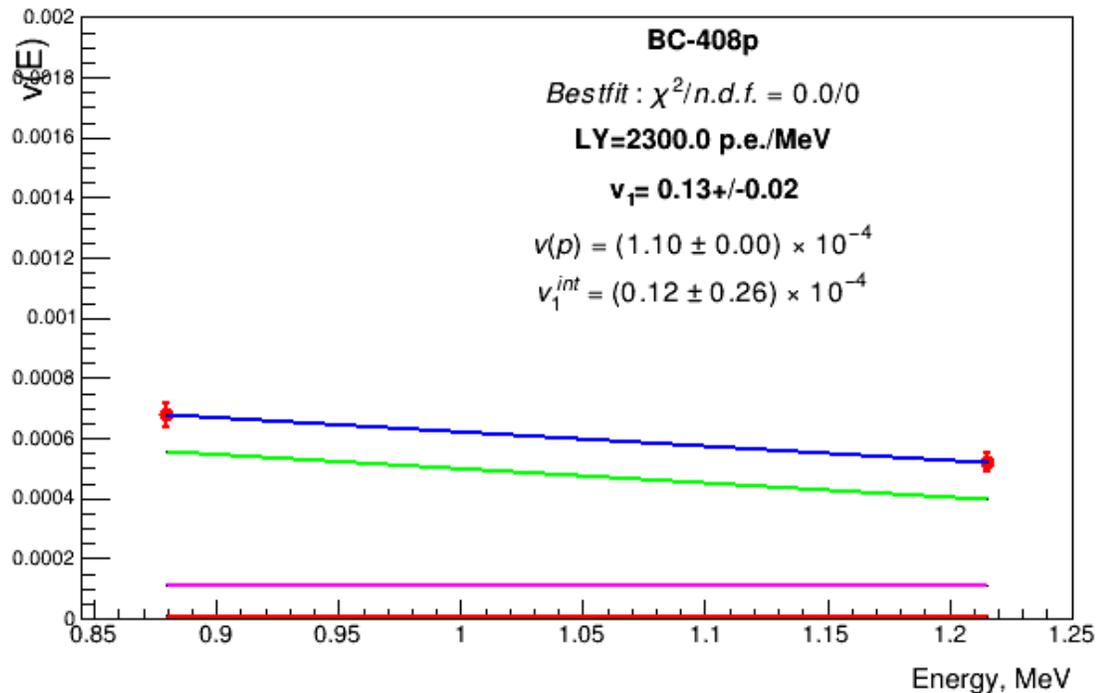
Нет чувствительности к $v(p)$ в используемом диапазоне энергий, поэтому параметр фиксирован на значении

$$v(p) = 1.1 \cdot 10^{-4}$$

LY=2300 ф.э./МэВ

$v_1 = 0.125 \pm 0.021$ - ограничен у значения, полученного при подгонке стат. части

Результаты подгонки для протонов



Ширина пучка 4,2 кэВ

Параметр оставлен свободным в подгонке:

$$\sigma(E) = 0,0 \pm 13,6 \text{ кэВ}$$

Параметр $v(p)$ фиксирован на значении

$$v(p) = 1.1 \cdot 10^{-4}$$

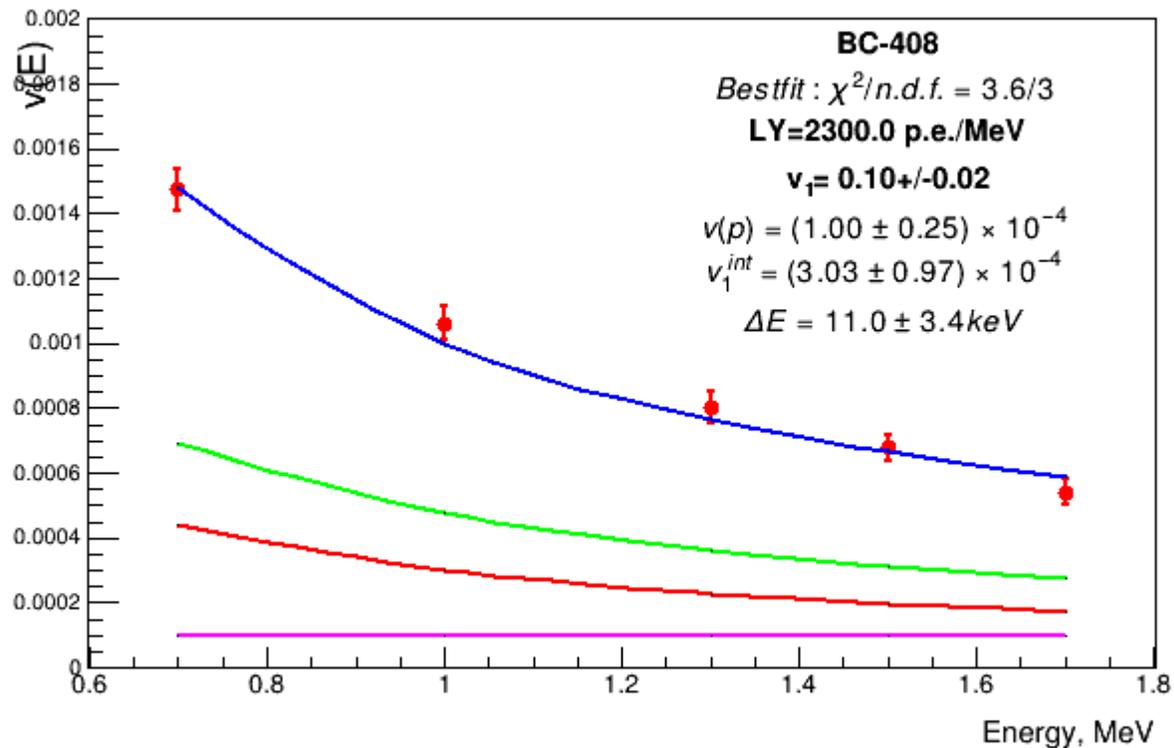
LY=2300 ф.э./МэВ

$v_1 = 0.125 \pm 0.021$ - ограничен у значения, полученного при подгонке стат. части

Вклад собственного разрешения отсутствует

При фиксированных $\sigma(E) = 4,2 \text{ кэВ}$ и $v_1^{int} = 0 \rightarrow v(p) = (1,05 \pm 0,25) 10^{-4}$

Подгонка с ограниченным $v(p)$



Бюджет при 1 МэВ:

$$\frac{1 + v_1}{LY} = \frac{1 + 0.10 \pm 0.02}{2300} = (4.8 \pm 0.1) \cdot 10^{-4}$$

$$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2 = \left(\frac{11,0 \pm 3,4}{1000}\right)^2 = (1.2 \pm 0.1) \cdot 10^{-4}$$

$$v(p) = (1.00 \pm 0.25) \cdot 10^{-4}$$

e^- / γ

$$v(Q) = v(p) + (1 + v(p)) \frac{Q_1}{Q} v_1^{int} + \frac{1 + v_1}{Q},$$

Или

$$\sigma_e^2(Q) = v(p)Q^2 + (1 + v(p))QQ_1v_1^{int} + (1 + v_1)Q,$$

Следствие для γ (пространственно-однородный детектор):

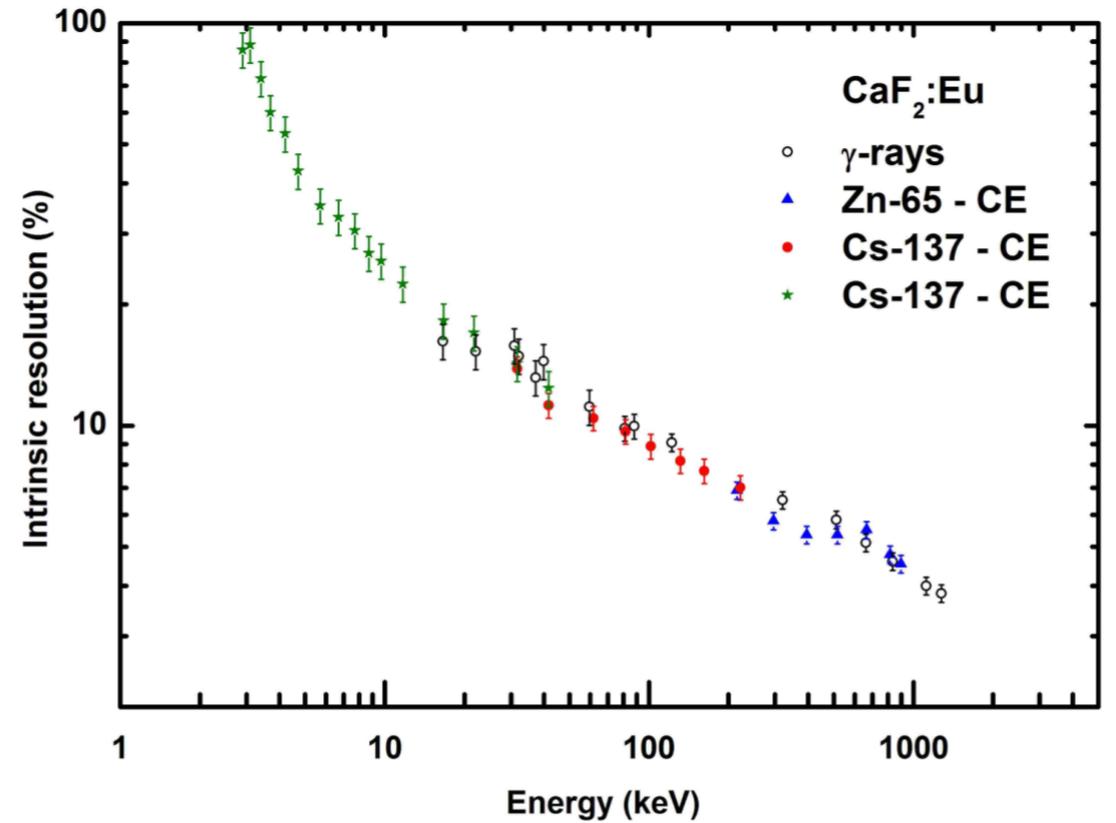
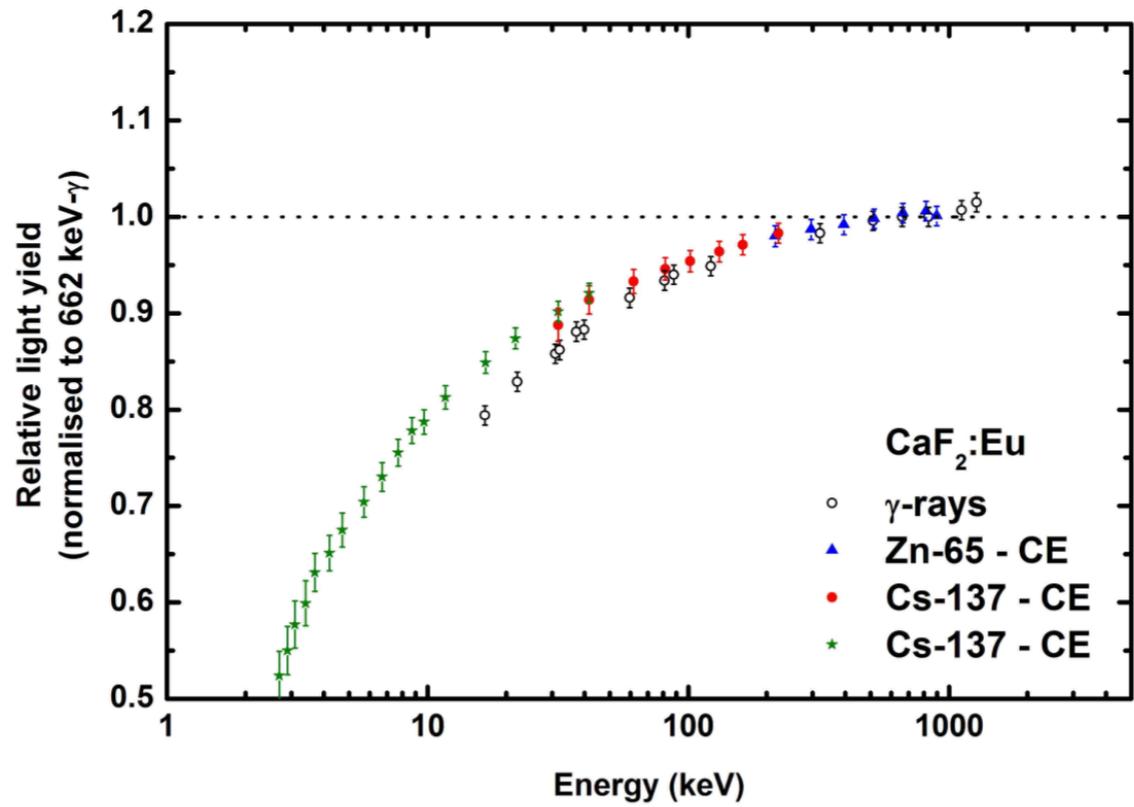
$$\sigma_\gamma^2(Q) = \sum \sigma_e^2(Q_i) = \sum (v(p)Q_i^2 + (1 + v(p))Q_iQ_1v_1^{int} + (1 + v_1)Q_i) =$$

$$\sum (v(p)Q_i^2) + (1 + v(p))QQ_1v_1^{int} + (1 + v_1)Q = v(p)Q^2 + (1 + v(p))QQ_1v_1^{int} + (1 + v_1)Q$$

Для электрона и γ , высвечивающие одинаковое количество света, энергетическое разрешение описывается тем же выражением с теми же параметрами

$$e^- / \gamma$$

L. Swiderski et al., "Electron response of some low-Z scintillators in wide energy range", 2012 JINST 7 P06011.



Измерение с LAB+PPO при 1 МэВ

Y.-Deng et al., "Exploring the intrinsic energy resolution of liquid scintillator to approximately 1 MeV electrons", JINST 17 (2022) P04018.

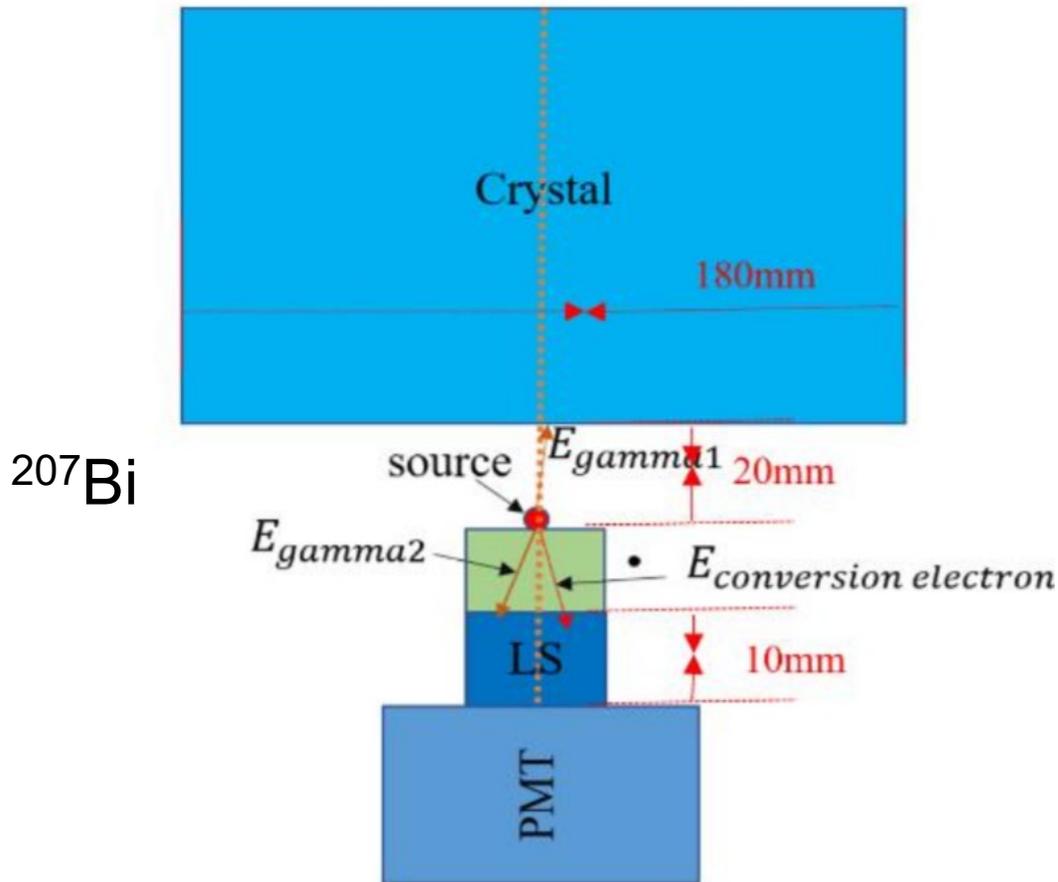
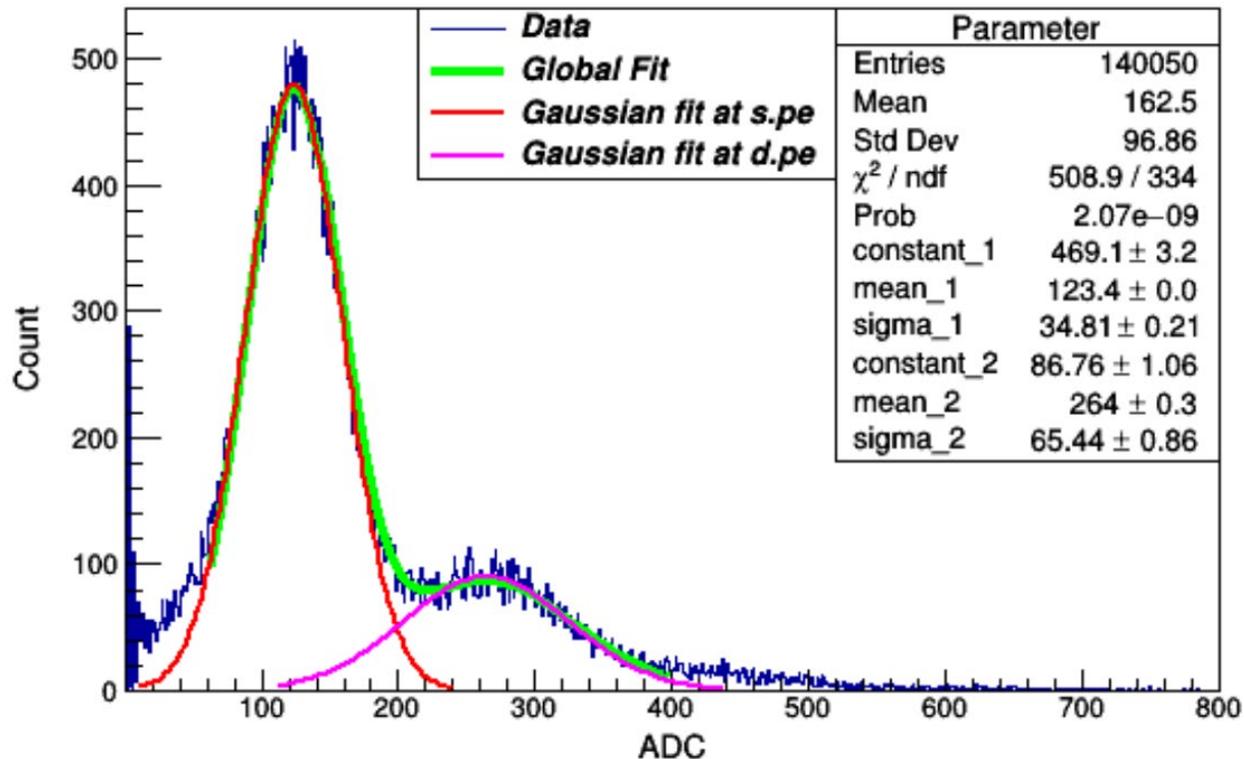


Table 3. Experimental results of the contribution of energy resolution.

Parameter	Formula	Fitted interval (keV)	Result
σ/E (a)	σ/E	940-1110	$2.96\% \pm 0.01\%$
δ_{st} (b)	$\sqrt{1/N_{\text{photoelectrons}}}$	/	$1.75\% \pm 0.00\%$
δ_{system} (c)	$\sqrt{(\delta(\sigma/E)_{\text{LaBr}_3})^2 - (\delta_{\text{stLaBr}_3})^2}$	640-685	$1.17\% \pm 0.00\%$
δ_{Edep} (d)	σ/E	960-980	$0.10\% \pm 0.00\%$
$\delta_{\text{uniformity}}$ (e)	σ/mean	/	$0.89\% \pm 0.11\%$, $0.17\% \pm 0.01\%$
$\delta_{\text{sp.e.}}$ (f)	$(\sigma/E)_{\text{sp.e.}}/\sqrt{N_{\text{photoelectrons}}}$	/	$0.35\% \pm 0.00\%$
$\delta_{\text{stability}}$ (g)	σ/mean	/	$0.16\% \pm 0.03\%$
δ_{int}	$\sqrt{a^2 - b^2 - c^2 - d^2 - e^2 - f^2 - g^2}$	/	$1.83\% \pm 0.06\%$

ΦЭУ: Hamamatsu CR160

Pei-Yi Feng et al., “The Intrinsic Energy Resolution of LaBr3(Ce) Crystal for GECAM”,
arXiv:2401.00226v1 [physics.ins-det] 30 Dec 2023



$$q_2 - q_1 = 264 - 123.4 = 140.6$$

$$\text{Положение пьедестала: } 140.6 - 123.4 = -17.2$$

$$P(2)/P(1) = \mu/2 = 0.262$$

$$\mu = 0.523$$

$$\bar{q} = \frac{\mu}{1 - e^{-\mu}} q_1 \quad \begin{matrix} q_1 = 0.779 * (162.5 + 17.2) = 140 \\ c = 0.88 \end{matrix}$$

$$v = \frac{1 - e^{-\mu}}{\mu} (1 + v_1) - e^{-\mu}$$

$$v(q) = (96.86 / (162.5 + 17.2))^2 = 0.291$$

$$v_1 = 0.134$$

Измерение с LAB+PPO

Table 3. Experimental results of the contribution of energy resolution.

Parameter	Formula	Fitted interval (keV)	Result
σ/E (a)	σ/E	940-1110	$2.96\% \pm 0.01\%$
δ_{st} (b)	$\sqrt{1/N_{\text{photoelectrons}}}$	/	$1.75\% \pm 0.00\%$
δ_{system} (c)	$\sqrt{(\delta(\sigma/E)_{\text{LaBr}_3})^2 - (\delta_{st\text{LaBr}_3})^2}$	640-685	$1.17\% \pm 0.00\%$
δ_{Edep} (d)	σ/E	960-980	$0.10\% \pm 0.00\%$
$\delta_{\text{uniformity}}$ (e)	σ/mean	/	$0.89\% \pm 0.11\%$, $0.17\% \pm 0.01\%$
$\delta_{\text{sp.e.}}$ (f)	$(\sigma/E)_{\text{sp.e.}}/\sqrt{N_{\text{photoelectrons}}}$	/	$0.35\% \pm 0.00\%$
$\delta_{\text{stability}}$ (g)	σ/mean	/	$0.16\% \pm 0.03\%$
δ_{int}	$\sqrt{a^2 - b^2 - c^2 - d^2 - e^2 - f^2 - g^2}$	/	$1.83\% \pm 0.06\%$

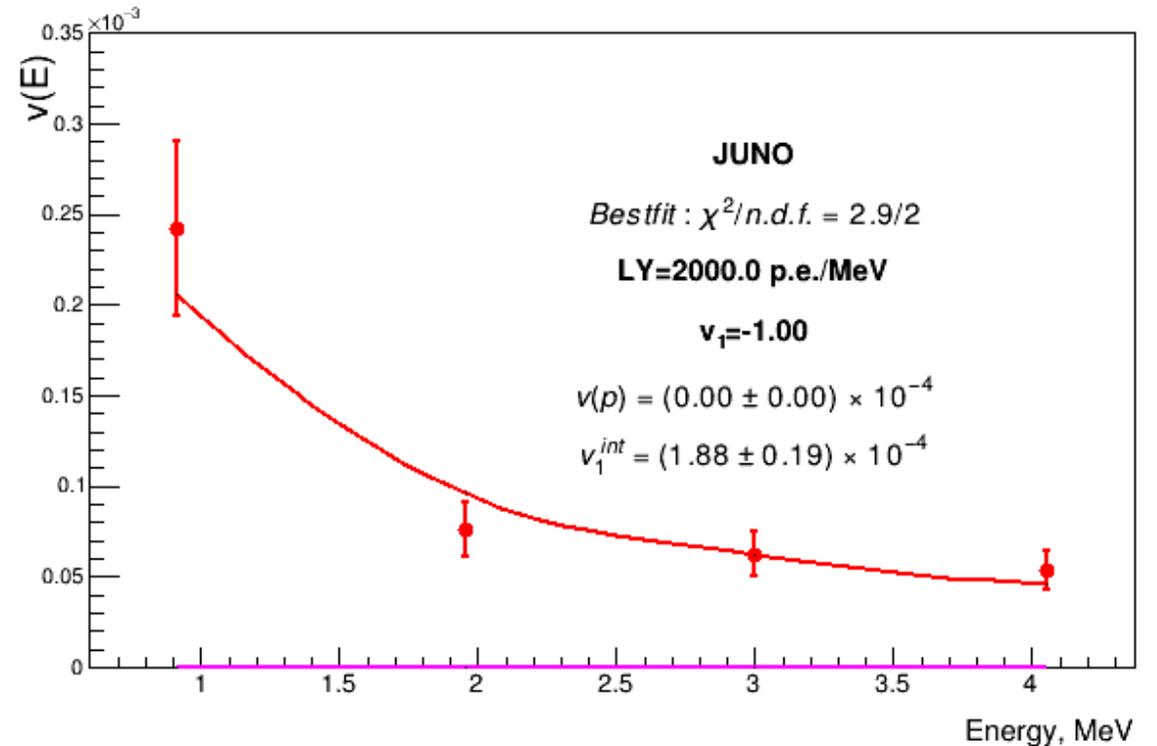
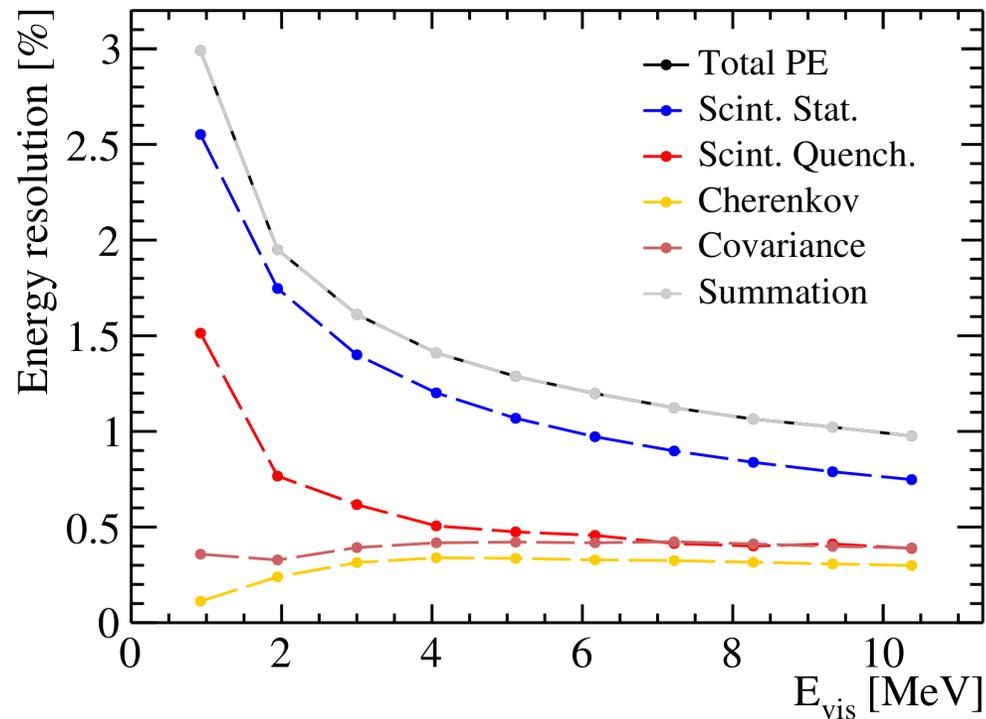
1.87 ± 0.08
 $< 1,14\%$
 не вычтено CP
 LaBr3, но
 включает $\nu(p)$
 0.68 ± 0.25
 1.89 ± 0.26

Все рассмотренные измерения

Источник	ЖОС	Интервал энергий	v_1^{int} $\times 10^{-4}$	$R_{\text{int}}(1 \text{ МэВ})$ %
Swidersky [1]	EJ301 ($\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$)	$10 < E < 667 \text{ кэВ}$	$2,01 \pm 0,26$	$1,49 \pm 0,08$
Swidersky [1]	BC408 ($\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$)	$10 < E < 667 \text{ кэВ}$	$2,08 \pm 0,27$	$1,44 \pm 0,09$
Swidersky [1]	BC408 ($\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$)	$10 < E < 4000 \text{ кэВ}$	$2,19 \pm 0,27$	$1,48 \pm 0,09$
Формозов [2]	LAB+1,5 г/л PPO	$35 < E < 65 \text{ кэВ}$	4.97 ± 2.69	$2,2 \pm 0,6$
Vo [3]	BC408 ($\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$)	$0.7 < E < 1.7 \text{ МэВ}$	$3,0 \pm 1,0$	$1,7 \pm 0,6$
Roemer [4]	EJ200	$36 < E < 1040 \text{ кэВ}$	$0,27 \pm 0,90$	$0,5 \pm 0,9$
Денг [5]	LAB+2,5 г/л PPO + 3 мг/л bis-MSB	$(1,83 \pm 0,06)\%$ @ 0,976 МэВ	$3,3 \pm 0,2$	$1,82 \pm 0,06$
Borexino [6]	PS + 1,5 г/л PPO	$v(N) = (11,5 \pm 1) @ 156 \text{ кэВ}$	$2,2 \pm 0,2$	$1,5 \pm 0,1$
Borexino [7]	PS + 1,5 г/л PPO	$\sigma_{\text{int}} = (1,69 \pm 0,23) @ 156$	$1,7 \pm 0,5$	$1,3 \pm 0,3$

JUNO

JUNO Collaboration, "Prediction of Energy Resolution in the JUNO Experiment", Chinese Phys. C 49 013003 (2025)



$$(\text{Вклад CP})^2 = \text{Total}^2 - \text{Scint.Stat.}^2$$

Согласие МК с моделью в области 1-4 МэВ достигается, если ошибки МК положить = 20%.

Заключение

- Все данные укладываются в рамки феноменологической модели с характерным поведением вклада $CP \sim 1/Q$ в области энергий 0,05-4 МэВ
- Вклад CP не отличается для электронов и гамма при том же количестве излучённого света (как и предсказывается моделью);
- Параметр, характеризующий CP , в органических сцинтилляторах составляет $R(1) \approx 1,5\%$ для электронов и гамма в области энергий 0,05-4 МэВ;
- Для протонов вклад CP согласуется с 0 при энергиях ~ 1 МэВ;
- При измерениях необъяснимую сложность составляет определение параметров одноэлектронного спектра ФЭУ; иногда эти данные отсутствуют;
- В ряде статей выделена нестатистическая часть полного разрешения вместо CP ;
- Не всегда обеспечена должная моноэнергетичность источника в измерениях;
- Схема измерений с 4 ФЭУ позволяет достаточно точно определить стат.часть вклада и уменьшить вклад неоднородности регистрации фотонов на ФЭУ;
- В МК JUNO в диапазоне энергий 1-4 МэВ поведение вклада CP не соответствует ожидаемому в модели