

Моделирование Оже-каскадов в Geant4

Абдурашитов Д.Н.

совместно с Ю.Малышкиным, В.Матушко и В.Suerfu

при участии В.Янца

Институт Ядерных Исследований, Троицк

21 Окт 2015, семинар ОЭФ

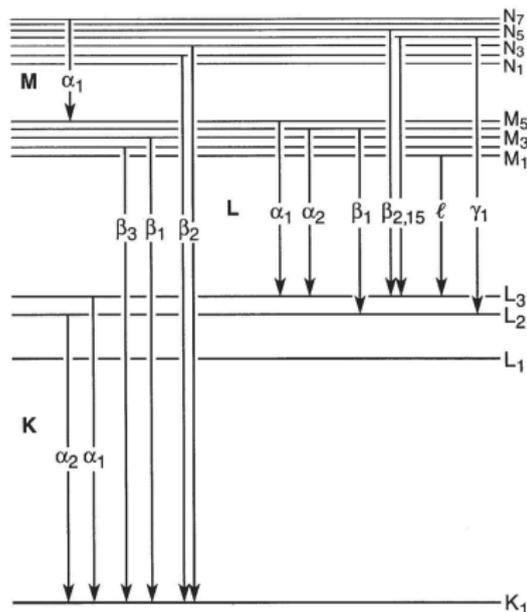
План доклада

- 1 Мотивация
- 2 Атомные оболочки: рентгеновское излучение и Оже-электроны
- 3 Детектор и набор спектров от ^{37}Ar и ^{71}Ge
- 4 Моделирование Geant4 и факторы систематического искажения
- 5 Сравнение с измеренными спектрами

Мотивация

- Поиск примеси стерильных нейтрино в распаде трития в пропорциональном счетчике
- Детальное изучение систематического искажения спектра
- Распад ^{37}Ar и ^{71}Ge с последующим излучением Оже-электронов дочерними ^{37}Cl и ^{71}Ga — естественный выбор для характеристики отклика
- Сравнение с модельным откликом от Geant4 дает возможность понять природу систематических факторов

Уровни атомных оболочек и переходы



LBNL/PUB-490 Rev. 3

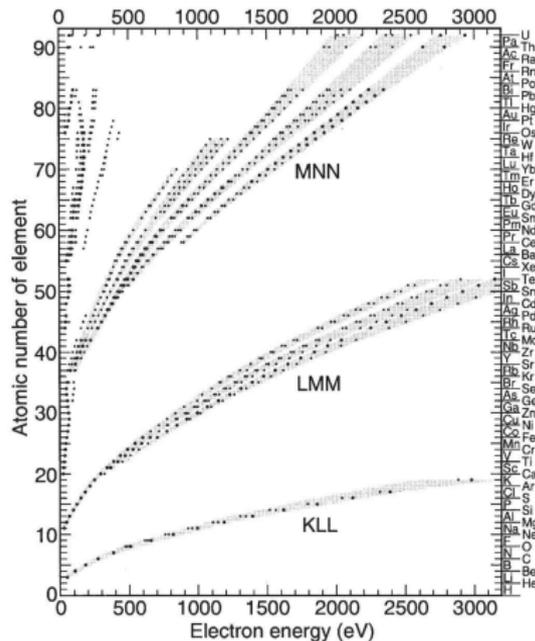
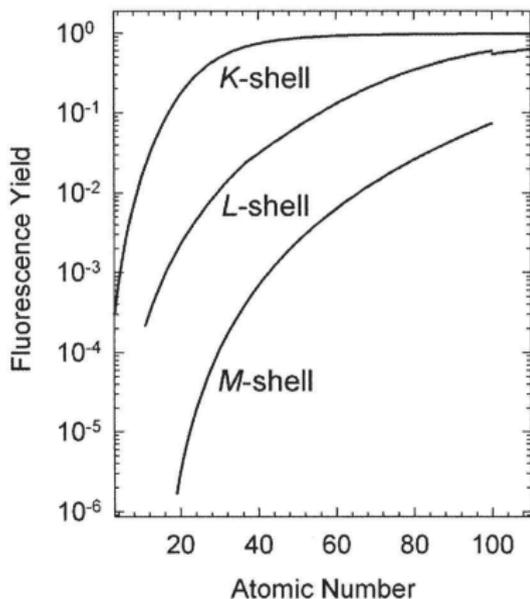
Center for X-Ray Optics
and
Advanced Light Source

X-RAY DATA BOOKLET

October 2009

Lawrence Berkeley National Laboratory
University of California
Berkeley, CA 94720

Выход флуоресценции и энергии Оже-электронов

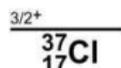
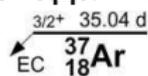


Детектор — газовый пропорциональный счетчик

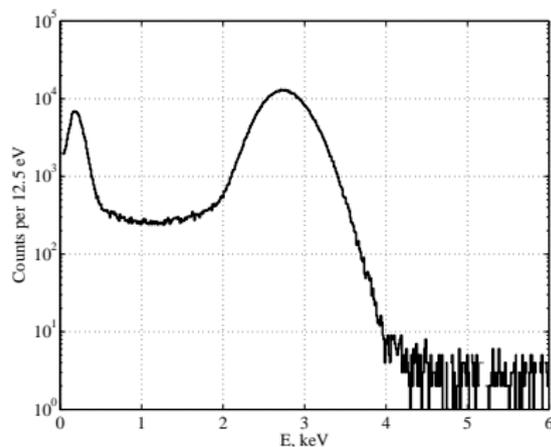
Классический счетчик — новый дизайн:

- цельнопаяный кварцевый корпус \varnothing 4 мм
- внутренняя поверхность покрыта 1 μ м слоем пиролитического углерода (катод)
- обычно заполняется Хе давлением 1 атм
- высокая стабильность → возможен длительный набор
- низкий порог (0.1 кэВ) → возможность измерять весь спектр

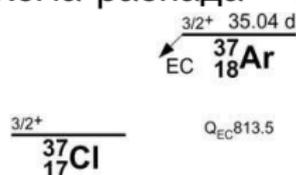


Излучение после распада ^{37}Ar Схема распада ^{37}Ar  $Q_{\text{EC}} 813.5$

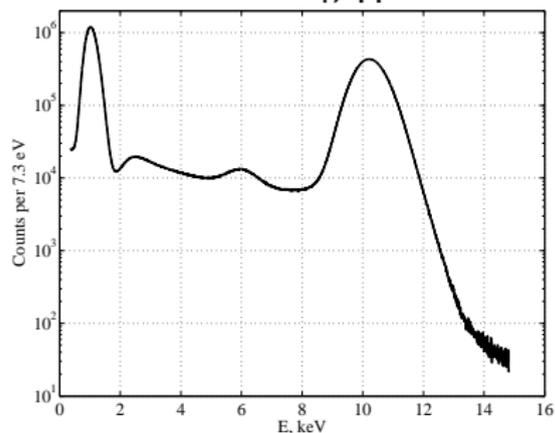
Мода захвата	Энергия всех Оже-электронов (кэВ)	Энергия рентгена (кэВ)	Выход (%)
K	2.823	0.0	81.5
K	0.202	2.621	2.7
K	0.201	2.622	5.5
K	0.007	2.816	0.5
L	0.270	0.0	8.9
M	0.018	0.0	0.9

Измеренный спектр смесь: Xe + ^{37}Ar , давл. 1 атм

В случае полного поглощения рентгеновского излучения и всех Оже-электронов в спектре формируются три основных пика: К-пик на 2.82 кэВ, L-пик на 0.27 кэВ и М-пик на 0.02 кэВ (ниже порога)

Излучение после распада ^{71}Ge Схема распада ^{71}Ge 

Мода захвата	Энергия всех Оже-электронов (кэВ)	Энергия рентгена (кэВ)	Выход (%)
K	10.367	0.0	41.4
K	1.143	9.224	13.7
K	1.116	9.251	27.4
K	0.107	10.260	1.7
K	0.103	10.264	3.5
L	1.299	0.0	10.3
M	0.160	0.0	2.0

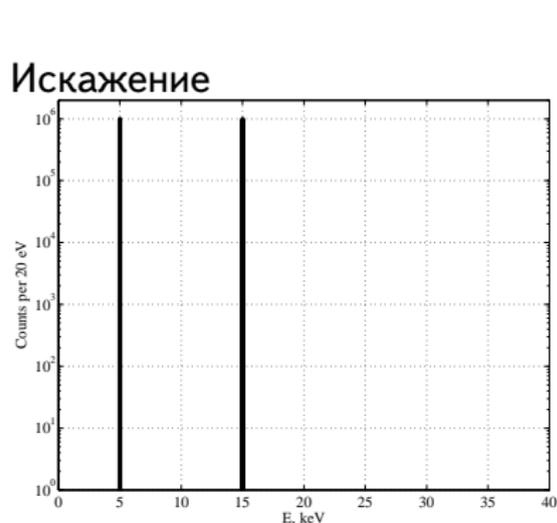
Измеренный спектр
смесь: $\text{Xe} + ^{71}\text{GeH}_4$, давл. 1 атм

В случае полного поглощения рентгеновского излучения и всех Оже-электронов в спектре формируются три основных пика: К-пик на 10.4 кэВ, L-пик на 1.2 кэВ и М-пик на 0.16 кэВ (ниже порога)

Моделирование Geant4

- Реальная геометрия счетчика
- ^{37}Ar и ^{71}Ge равномерно распределены по объему
- Пакет моделей PENELOPE, библиотеки EADL, EEDL и EPDL97
- Взаимодействия фотонов, электронов и позитронов (включая тормозное излучение и ионизацию), а также релаксация атомных оболочек
- Газовое лавинное размножение возле анодной нити не моделируется

ФАКТОРЫ СИСТЕМАТИЧЕСКОГО ИСКАЖЕНИЯ



Фактор

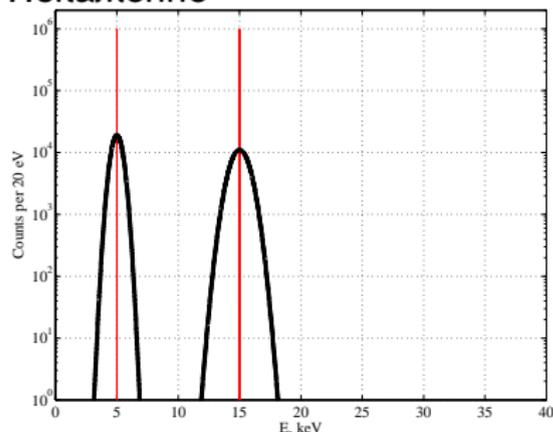
- Две линии электронов:
5 и 15 кэВ
- Разрешение:
13% на 10.4 кэВ
- Торцевой эффект:
5%
- Неразличимые наложения:
5% (для иллюстрации,
обычно менее 0.1%)

Корректное сравнение возможно только после систематического искажения модельного спектра

ФАКТОРЫ СИСТЕМАТИЧЕСКОГО ИСКАЖЕНИЯ

Фактор

Искажение



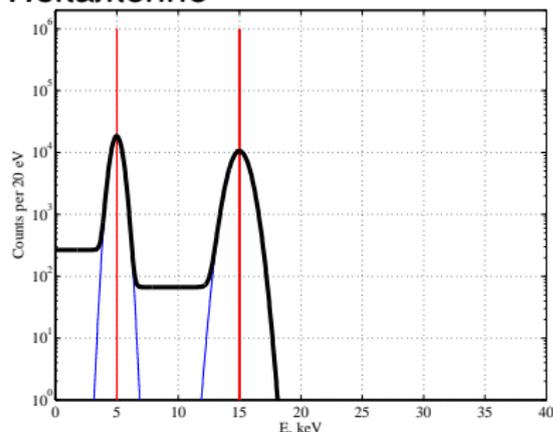
- Две линии электронов:
5 и 15 кэВ
- Разрешение:
13% на 10.4 кэВ
- Торцевой эффект:
5%
- Неразличимые наложения:
5% (для иллюстрации,
обычно менее 0.1%)

Корректное сравнение возможно только после систематического искажения модельного спектра

ФАКТОРЫ СИСТЕМАТИЧЕСКОГО ИСКАЖЕНИЯ

Фактор

Искажение



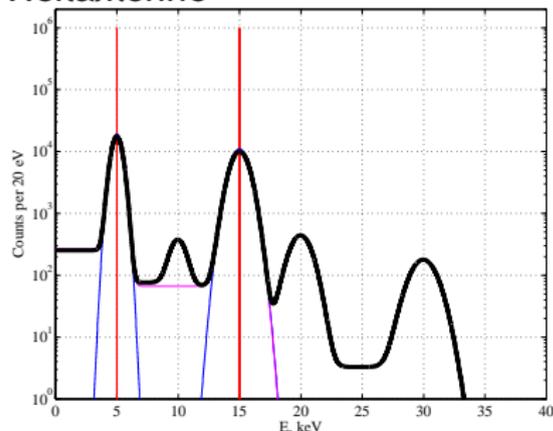
- Две линии электронов:
5 и 15 кэВ
- Разрешение:
13% на 10.4 кэВ
- Торцевой эффект:
5%
- Неразличимые наложения:
5% (для иллюстрации,
обычно менее 0.1%)

Корректное сравнение возможно только после систематического искажения модельного спектра

ФАКТОРЫ СИСТЕМАТИЧЕСКОГО ИСКАЖЕНИЯ

Фактор

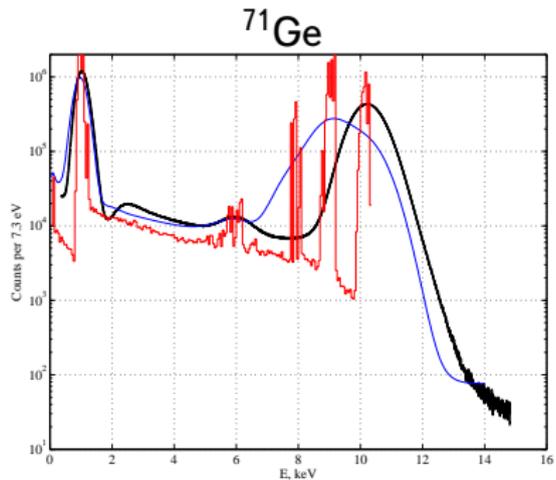
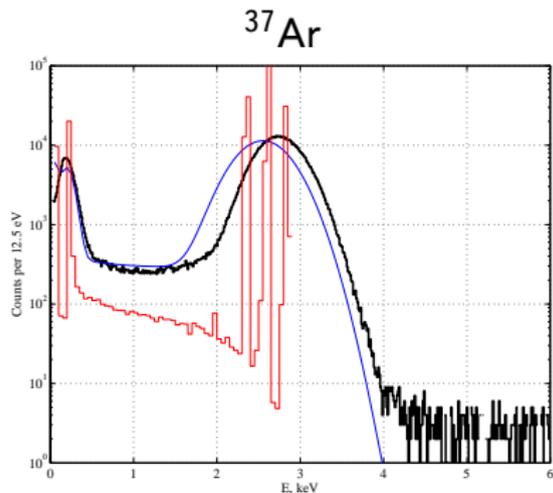
Искажение



- Две линии электронов:
5 и 15 кэВ
- Разрешение:
13% на 10.4 кэВ
- Торцевой эффект:
5%
- Неразличимые наложения:
5% (для иллюстрации,
обычно менее 0.1%)

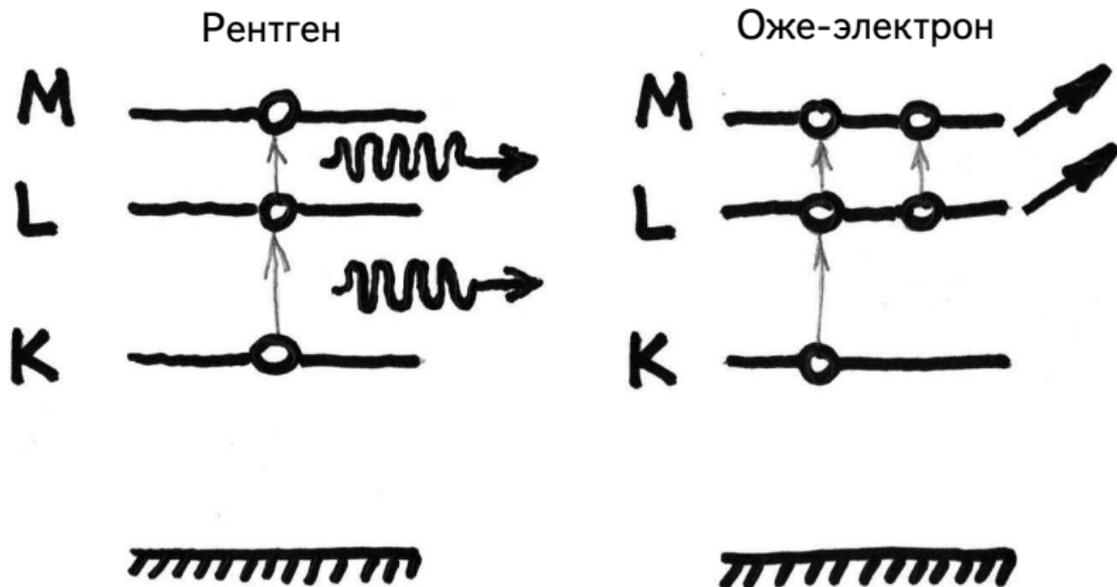
Корректное сравнение возможно только после систематического искажения модельного спектра

МОДЕЛИРОВАНИЕ: ОТКЛИК ДО ИСПРАВЛЕНИЯ КОДА



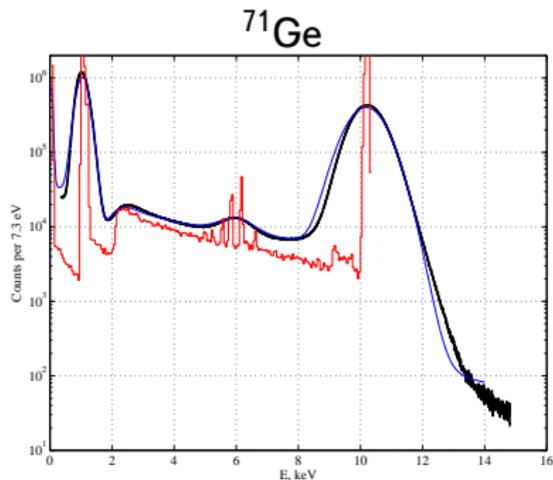
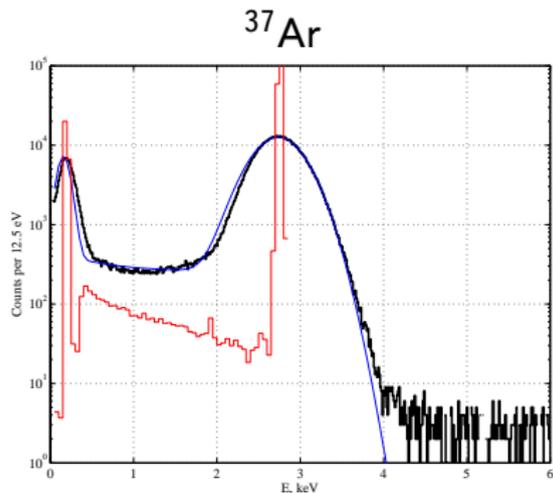
- Измеренный спектр
- Модельный отклик от Geant4
- Модельный отклик после искажения

GEANT4 и ОЖЕ-КАСКАДЫ



- Geant4 v.10.1 не отслеживает вторую вакансию!
- Дисбаланс по энергии → **локальное энерговыведение**
- добавляется a posteriori и предполагается неионизирующим

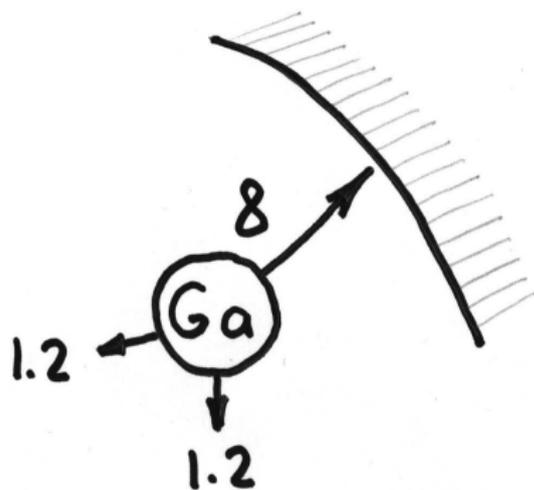
МОДЕЛИРОВАНИЕ: ОТКЛИК ПОСЛЕ ИСПРАВЛЕНИЯ КОДА



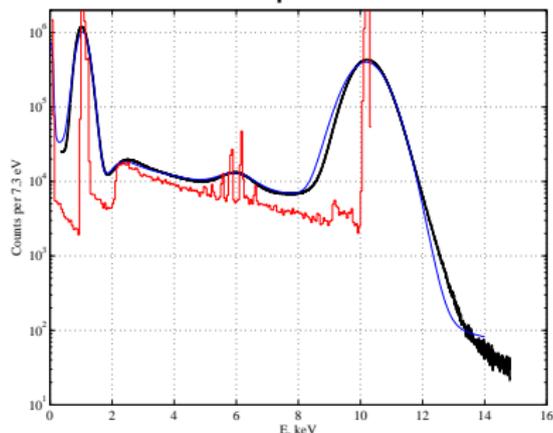
- Измеренный спектр
- **Модельный отклик от Geant4**
- **Модельный отклик после искажения**

ПРИСТЕНОЧНЫЕ СОБЫТИЯ И ПИК 2.4 КЭВ

К-захват: энергия 10.4 кэВ



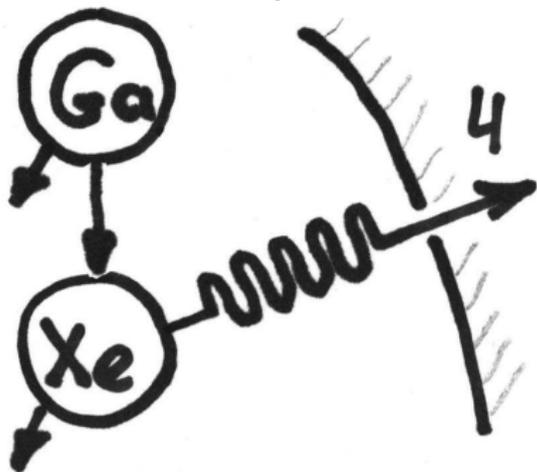
Спектр ^{71}Ge



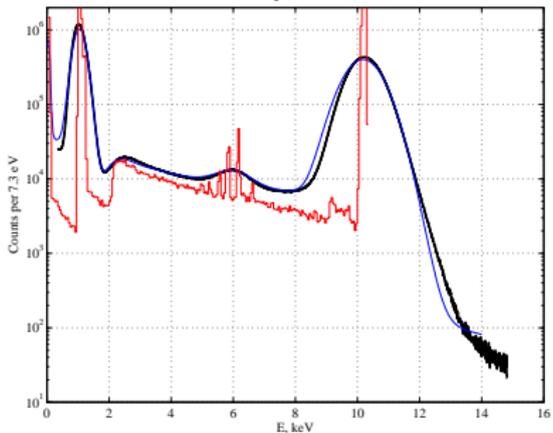
- KLL Оже-электрон 8 кэВ может частично уйти в стенку
- Если он уходит полностью, для регистрации остается энергия именно 2-х вакансий на L-оболочке галлия (в сумме 2.4 кэВ)

ПРИСТЕНОЧНЫЕ СОБЫТИЯ И ПИК ВЫЛЕТА 6.0 кЭВ

К-захват: энергия 10.4 кЭВ



Спектр ^{71}Ge



- Возбуждение ксенона начиная с L-(5 кЭВ) и M-оболочки (1 кЭВ)
- В случае вылета вторичного кванта он уносит с собой энергию примерно 4 кЭВ → формируется пик вылета 6 кЭВ

Заключение

- Отклик счетчика на ^{37}Ar и ^{71}Ge воспроизведен в деталях
- Факторы систематической неопределенности под полным контролем
- Модификация кода закреплена в официальном релизе Geant4
- Начиная с версии 10.2 Geant4 правильно отслеживает Оже-переходы
- Результаты работы изложены в [arXiv:1509.02669](https://arxiv.org/abs/1509.02669)