

Исследование электролюминесценции и первичных сцинтилляций в видимом диапазоне в детекторах на основе жидкого аргона

по материалам кандидатской диссертации

ОЛЕЙНИКОВ Владислав Петрович

Специальность: 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики

Научный руководитель: д.ф.-м.н. Бузулуцков А.Ф., д.ф.-м.н., академик РАН Бондарь А.Е.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

Лаб. 3-3

Семинар в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Джелепова

6 февраля 2025

План доклада:

- Введение
- Описание экспериментальной установки
- Считывание двухфазных аргоновых детекторов на КФЭУ-матрицу, используя электролюминесценцию в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне
- Изучение первичных сцинтилляций в видимом диапазоне в чистом жидком аргоне
- Изучение первичных сцинтилляций в видимом диапазоне в жидком аргоне с примесью метана
- Выводы и заключение

~40 мин.

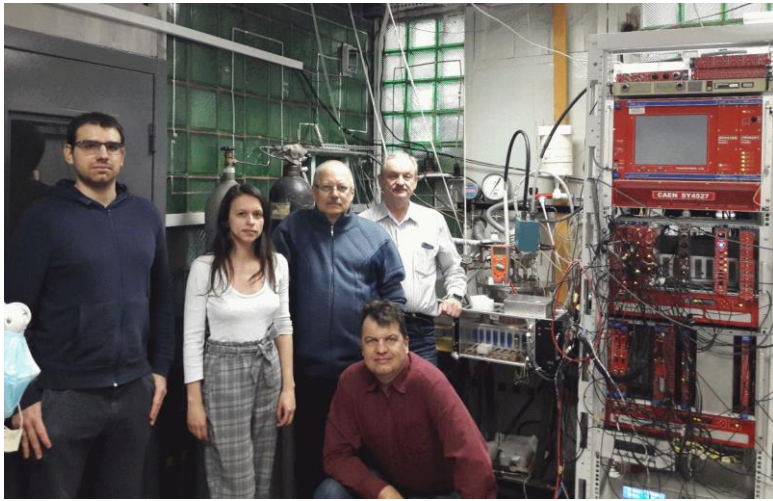
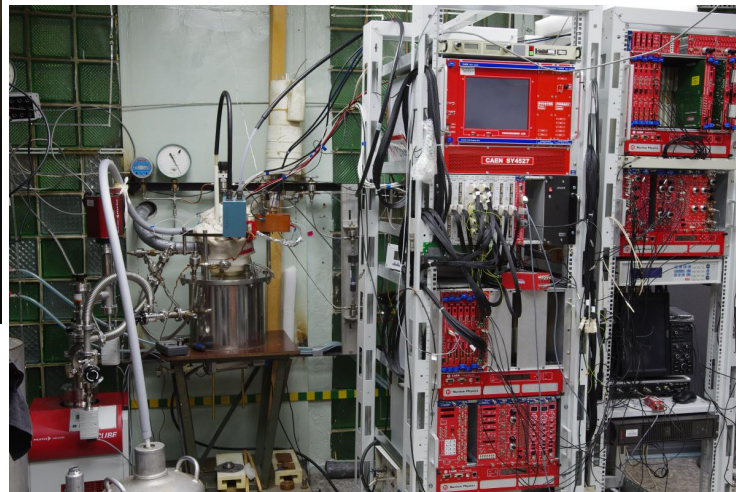
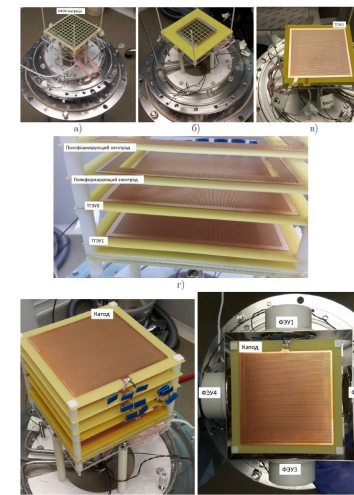
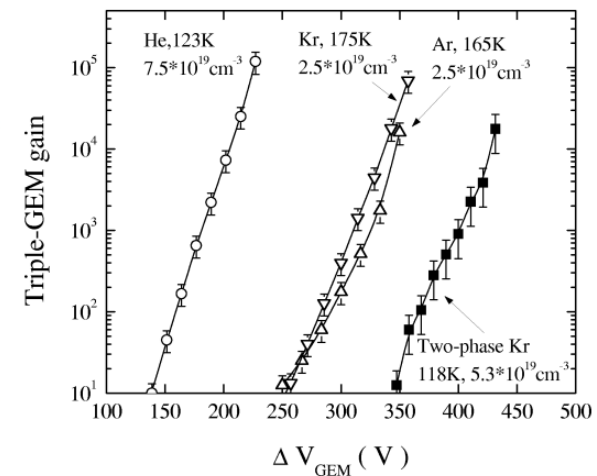
Введение

В лаборатории 3-3 ИЯФ СО РАН с 2011 года ведётся разработка двухфазного криогенного детектора на основе аргона – прототипа детектора темной материи. Наша группа является участником международной коллаборации DarkSide.

Основные направления исследований:

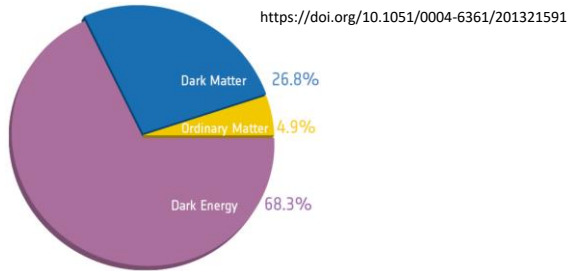
- изучение работы газовых электронных умножителей при криогенных температурах
- измерение ионизационных выходов ядер отдачи в аргоне
- изучение пленок сместителя спектра (ТФБ)
- изучение механизмов первичных сцинтилляций и электролюминесценции в видимом и инфракрасном как в чистом аргоне, так и его смесях с другими газами

<https://doi.org/10.1109/TNS.2003.820633>



Введение. Детекторы WIMP.

https://doi.org/10.1142/9789814390163_0011



Аннигиляция. $X + X \rightarrow SM + SM$
Рождение. $SM + SM \rightarrow X + X + \{SM\}$
Рассеяние. $SM + X \rightarrow SM + X$

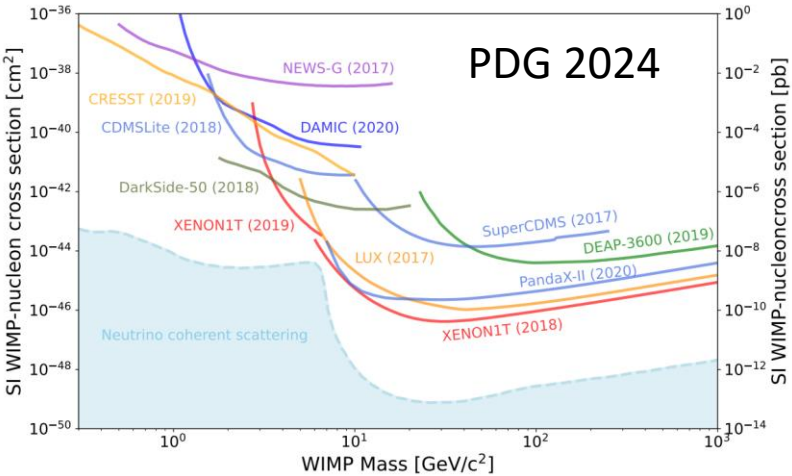
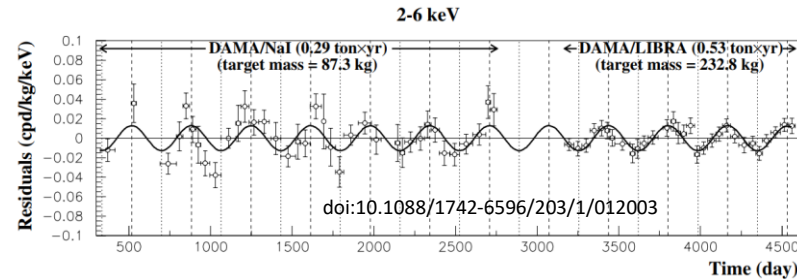
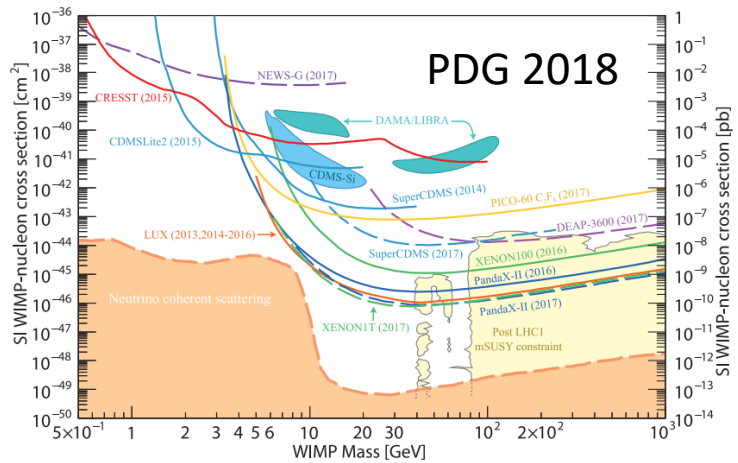
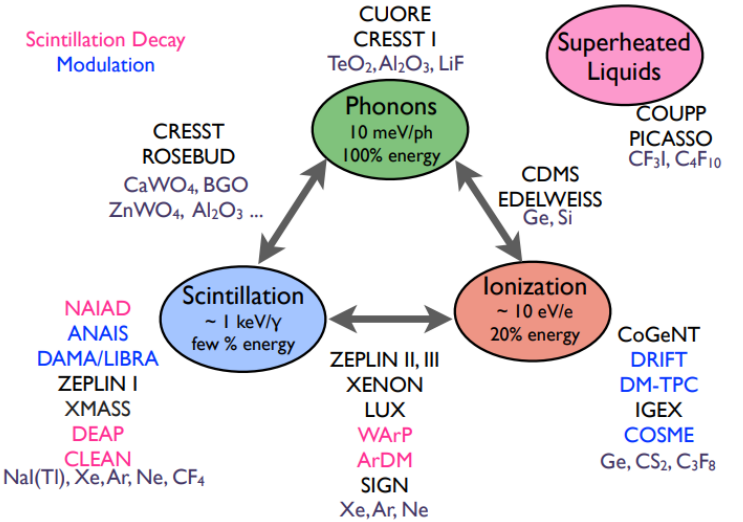


Table 27.1: Best constraints from direct detection experiments on the SI (at high >5 GeV and low <5 GeV masses) and SD DM-nucleon couplings.

Experiment	Target	Fiducial mass [kg]	Cross section [cm ²]	DM mass [GeV]	Ref.
Spin independent high mass (>5 GeV)					
LUX-ZEPLIN	Xe	5500	9.2×10^{-48}	36	[103]
PandaX-4T	Xe	2670	3.8×10^{-47}	40	[104]
XENONnT	Xe	4180	2.6×10^{-47}	30	[105]
SuperCDMS	Ge	12	1.0×10^{-44}	46	[106]
DarkSide-50	Ar	20	1.9×10^{-43}	10	[107]
DEAP-3600	Ar	2000	3.9×10^{-45}	100	[108]
Spin independent low mass (<5 GeV)					
LUX (Migdal)	Xe	118	6.9×10^{-38}	2	[109]
XENON1T (Migdal)	Xe	1042	3×10^{-40}	2	[110]
XENON1T (ionisation only)	Xe	1042	3.6×10^{-41}	3	[111]
DarkSide-50 (ionisation only)	Ar	20	1.4×10^{-42}	2	[107]
SuperCDMS (CDMSlite)	Ge	0.6	2×10^{-40}	2	[112]
SuperCDMS (CDMSlite, Migdal)	Ge	0.6	6×10^{-38}	2	[113]
CRESST	CaWO ₄ - O	0.024	1×10^{-39}	2	[114]
CRESST	Si	0.0035	4.5×10^{-32}	0.15	[115]
DAMIC	Si	0.3	1×10^{-40}	4	[116]
NEWS-G	Ne	0.3	1×10^{-38}	2	[117]
Spin dependent proton					
PICO60	C ₃ F ₈ - F	49	3.2×10^{-41}	25	[118]
PandaX-4T	Xe	2670	1.7×10^{-40}	40	[119]
LUX-ZEPLIN	Xe	5500	4.2×10^{-41}	32	[103]
XENONnT	Xe	4180	1.4×10^{-40}	30	[105]
Spin dependent neutron					
PandaX-4T	Xe	2670	5.8×10^{-42}	40	[119]
LUX-ZEPLIN	Xe	5500	1.5×10^{-42}	30	[103]
XENONnT	Xe	4180	4.3×10^{-42}	30	[105]



Noble Liquids: Properties

- Ionization and scintillation light used for detection (transparency to own scintillation).
- Ionization electrons can be drifted over long distances in these liquids.
- Excellent dielectric properties allow these liquids to accommodate very high-voltages.
- Argon is relatively cheap and easy to obtain (1% of atmosphere).

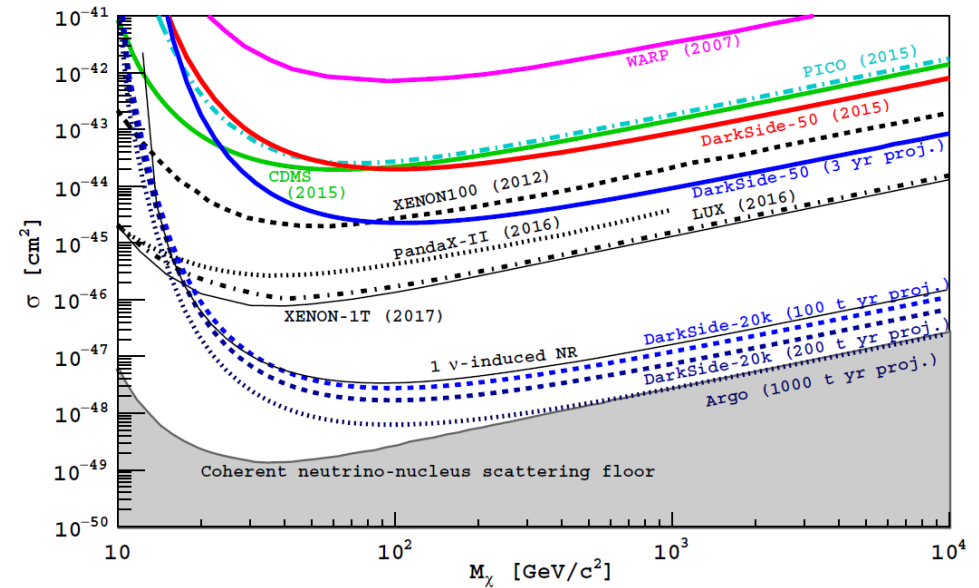
from Mitch Soderberg

	He	Ne	Ar	Kr	Xe	Water
Boiling Point [K] @ 1atm	4.2	27.1	87.3	120.0	165.0	373
Density [g/cm ³]	0.125	1.2	1.4	2.4	3.0	1
Radiation Length [cm]	755.2	24.0	14.0	4.9	2.8	36.1
Scintillation [γ/MeV]	19,000	30,000	40,000	25,000	42,000	
dE/dx [MeV/cm]	0.24	1.4	2.1	3.0	3.8	1.9
Scintillation λ [nm]	80	78	128	150	175	
ppm in air	0	12	9500	1	0.1	

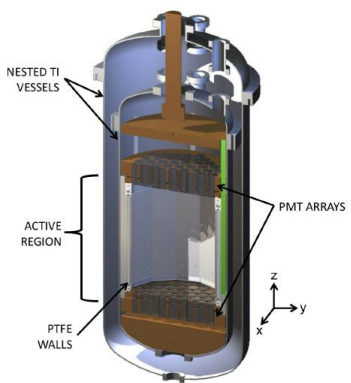
Введение. Масштабирование детектора.

- Одним из возможных путей дальнейшего прогресса в прямом поиске темной материи является увеличение массы рабочего вещества детектора (при уменьшении уровня фона).
- Среди множества типов детекторов особенно выделяются двухфазные (жидкость-газ) детекторы на основе аргона или ксенона, поскольку они могут быть относительно просто масштабированы.
- Возможности по масштабированию детекторов на основе аргона гораздо шире. Так, в коллаборации DarkSide уже реализовали двухфазные детекторы с массой аргона 10 и 50 кг и далее планируется создание детекторов с массой аргона 20, 100, 300 тонн.

<https://doi.org/10.1140/epjp/i2018-11973-4>



LUX
(250 kg)



PANDAX-II
(500 kg)



XENON1T
(2000 kg)



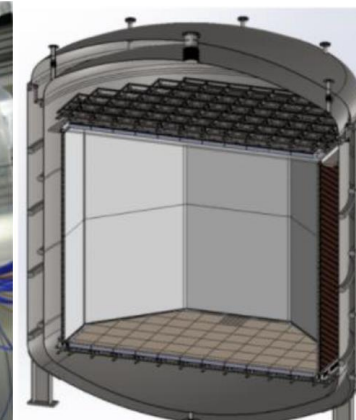
DarkSide-10
(10 kg)



DarkSide-50
(50 kg)



DarkSide-20k
(20 tons)
2020-202?

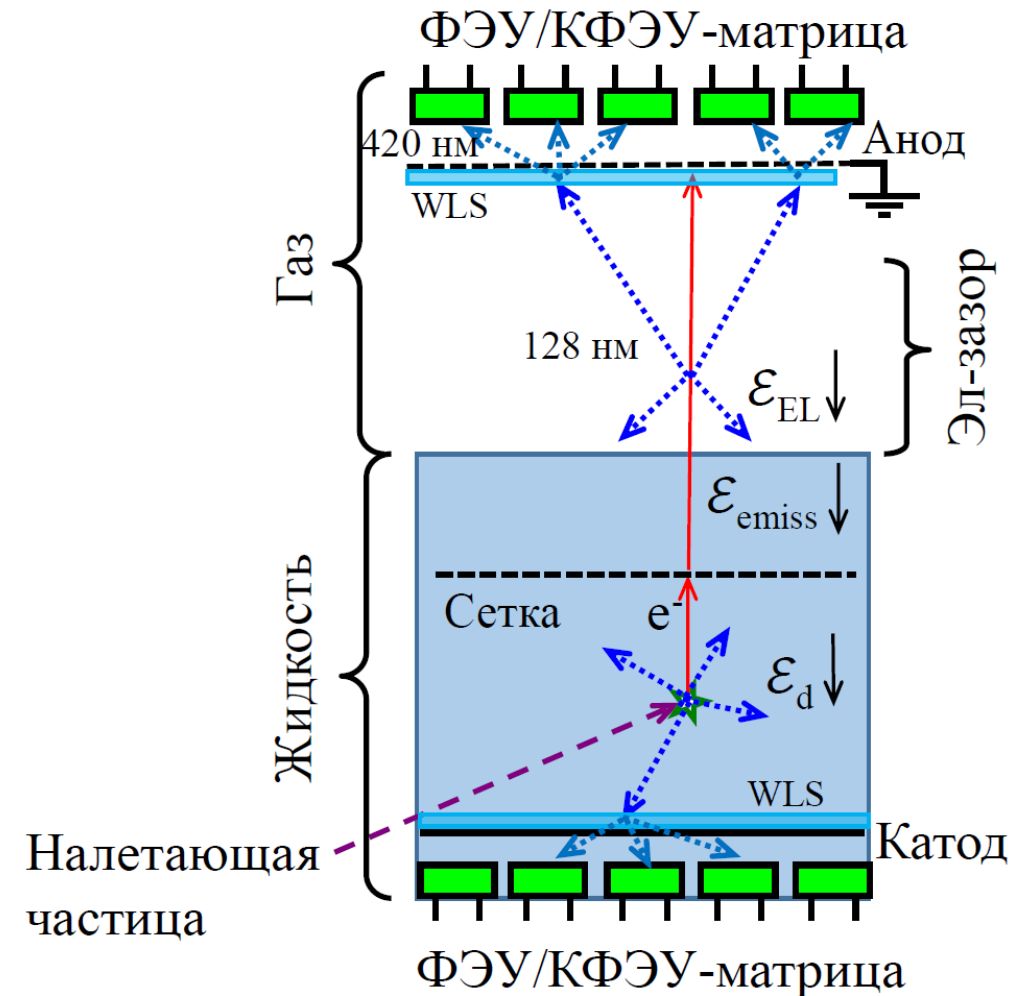


ARGO
(300 tons)
20??



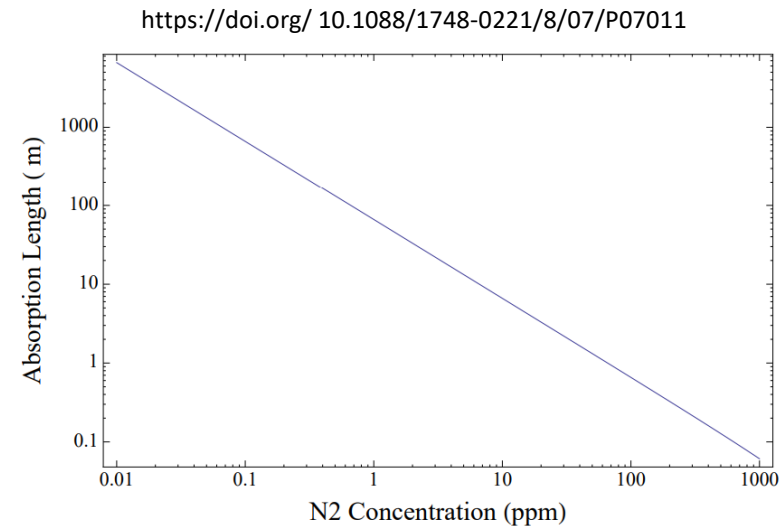
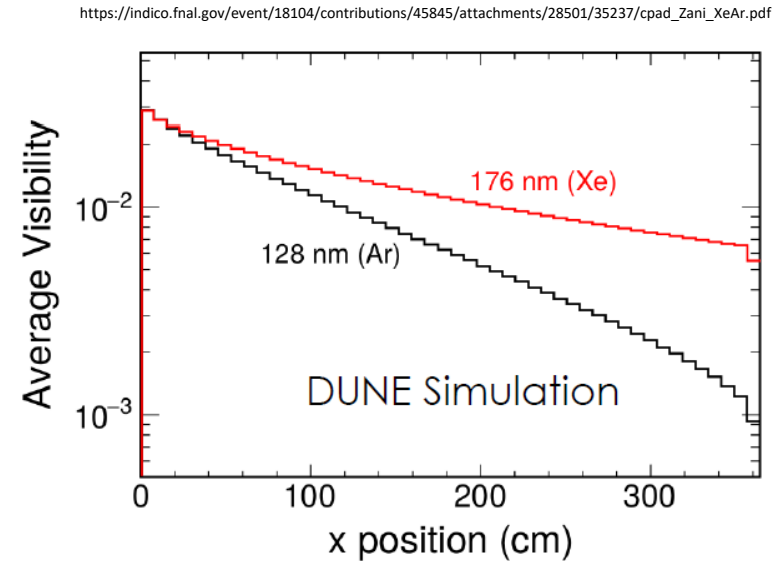
Введение. Двухфазный аргоновый детектор.

- При прохождении частицы через двухфазный детектор рассеяние будет происходить преимущественно в жидкой фазе.
- Световой сигнал, возникающий в области взаимодействия налетающей частицы с веществом детектора, называют сигналом S1 или сигналом первичных сцинтилляций.
- При приложении электрического поля к объему детектора часть электронов в электрон-ионных парах может избежать рекомбинации и попасть в газовую фазу, где при столкновении электронов с атомами газа при достаточно высоком электрическом поле возникает свечение за счет эффекта ЭЛ; такой тип сигнала называется сигналом S2 или ЭЛ сигналом.
- Доминирующим механизмом излучения как S1, так и S2 сигнала является эксимерный механизм, где в результате распада эксимеров (возбужденных молекул) происходит излучение в ВУФ с длиной волны 128 ± 10 (ПШПВ) нм.
- Зарегистрировать ВУФ напрямую сложно, поэтому используют смеситель спектра (чаще всего ТФБ), переизлучающий ВУФ в видимый диапазон.
- Данную схему считывания, основанную на регистрации переизлученного ВУФ можно назвать эксимерной или классической.



Введение. Регистрация излучения.

- ТФБ малотоксичен и обладает высокой эффективностью переизлучения (50-100%) относительно других сместителей спектра, но есть несколько проблем:
 - нестабильность светосбора на больших временных масштабах из-за его растворения в жидком аргоне и отслаивания от подложки в криогенных условиях [<https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/02/P02021>]
 - ТФБ напыляют на поверхности в условиях низкого давления, что вызывает проблемы при создании масштабных детекторов [<https://doi.org/10.3390/instruments5010004>]
- Регистрация ВУФ возможна напрямую при помощи КФЭУ, но ВУФ имеет малую длину поглощения в жидком аргоне в присутствии примесей (~1 м), поэтому есть ограничения на размер детектора [<https://doi.org/10.1088/1748-0221/8/07/P07011>]
- Другой возможный вариант - использование механизмов излучения в видимом и ИК-диапазоне.



Введение. Схемы считывания.

- В рамках данной диссертационной работы были рассмотрены альтернативные схемы считывания, которые могут сделать возможной работу детектора без сместителя спектра.

Экцимерная (классическая) схема считывания

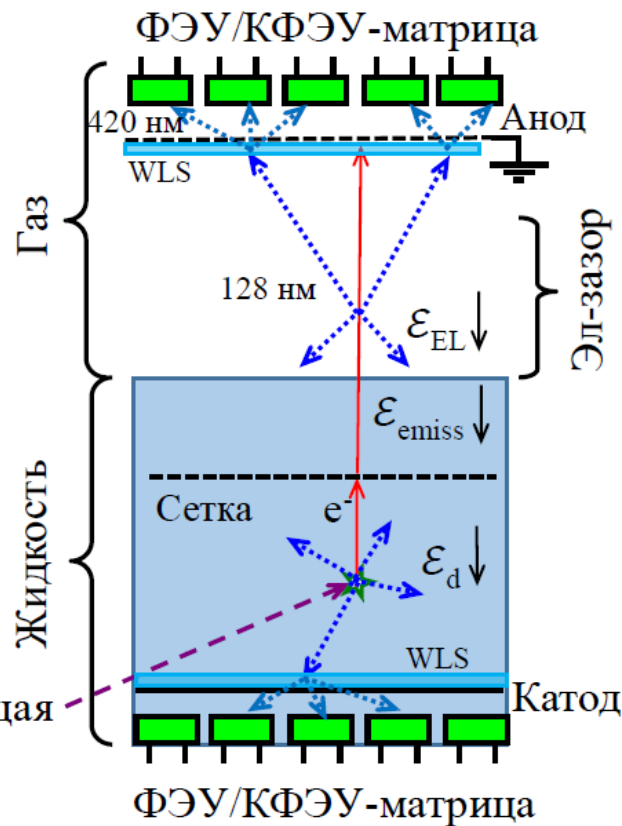


Схема прямого считывания ЭЛ-зазора на КФЭУ-матрицу

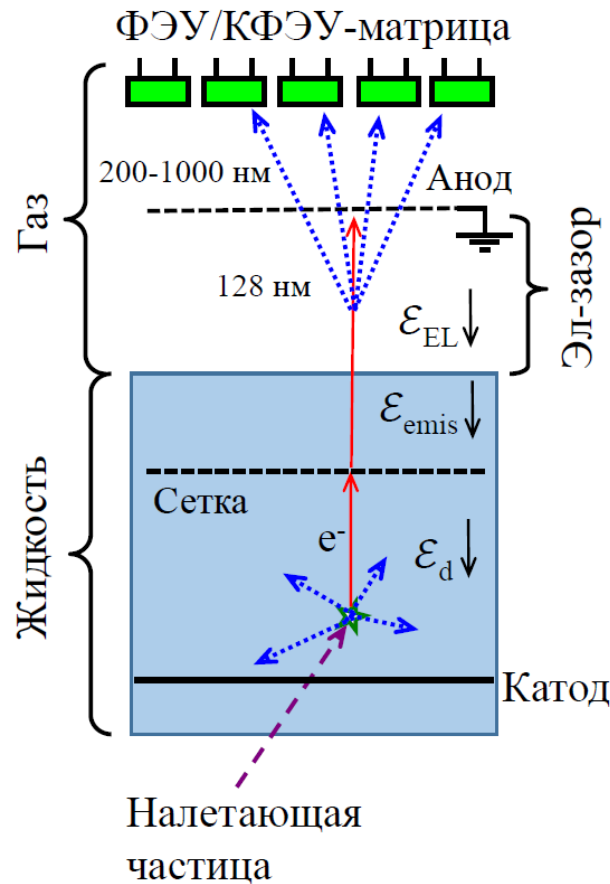
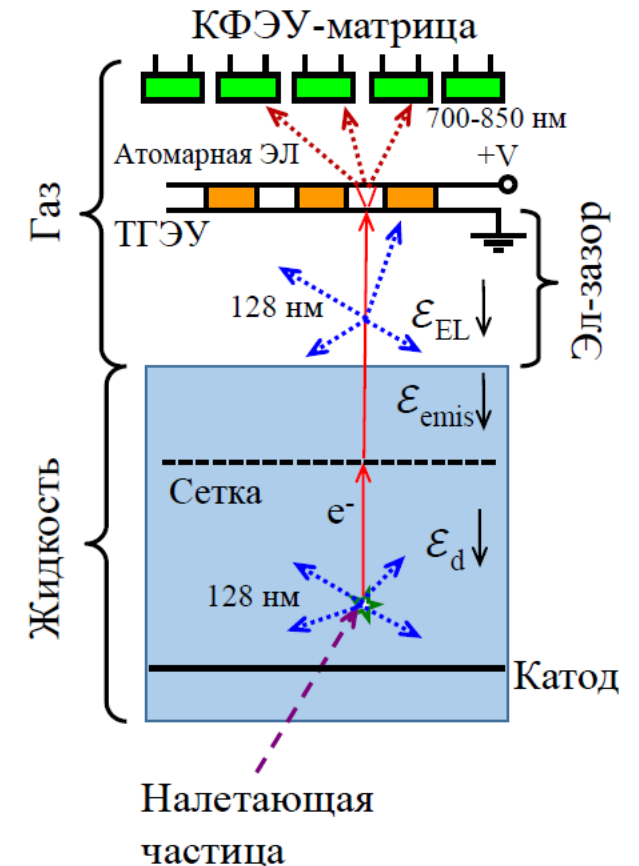
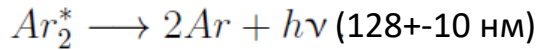


Схема считывания с использованием комбинированного умножителя ТГЭУ/КФЭУ-матрица



Введение. Механизмы излучения в аргоне.

- Экимерный механизм. В GAr и LAr.



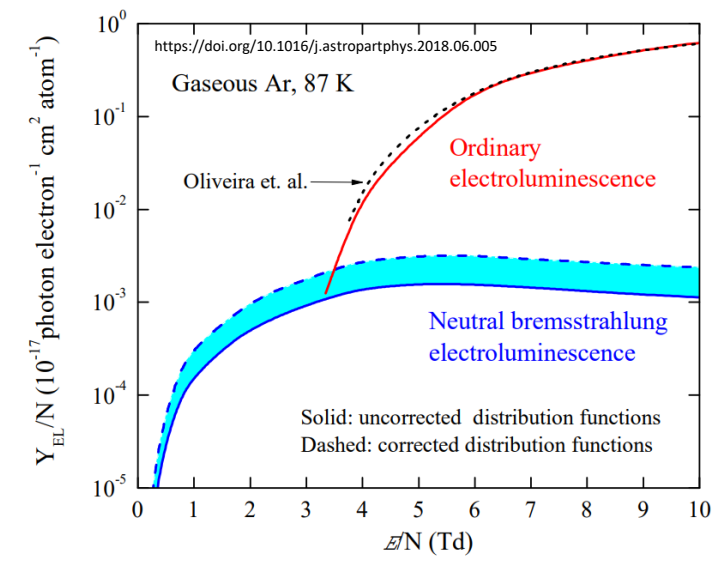
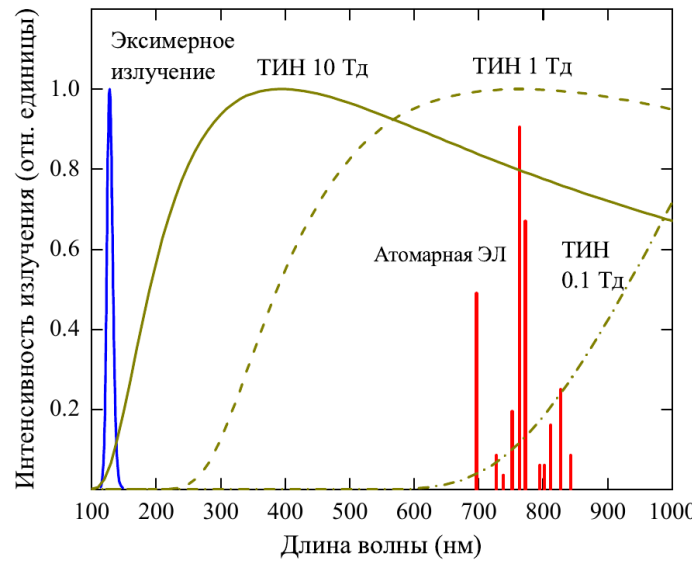
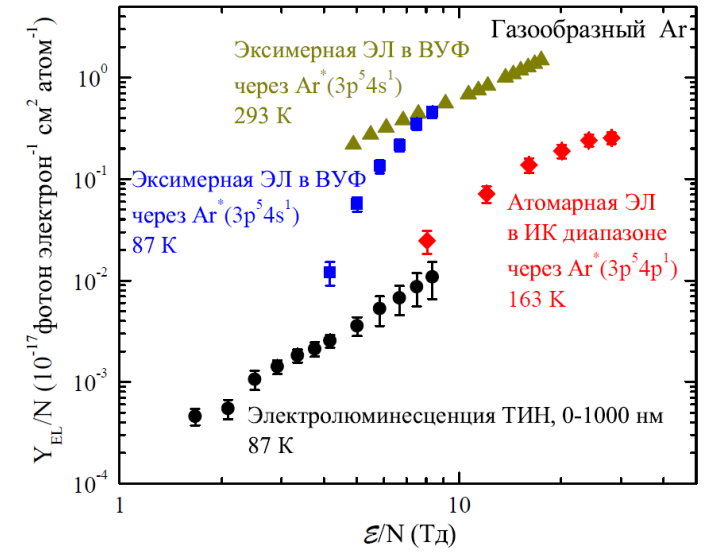
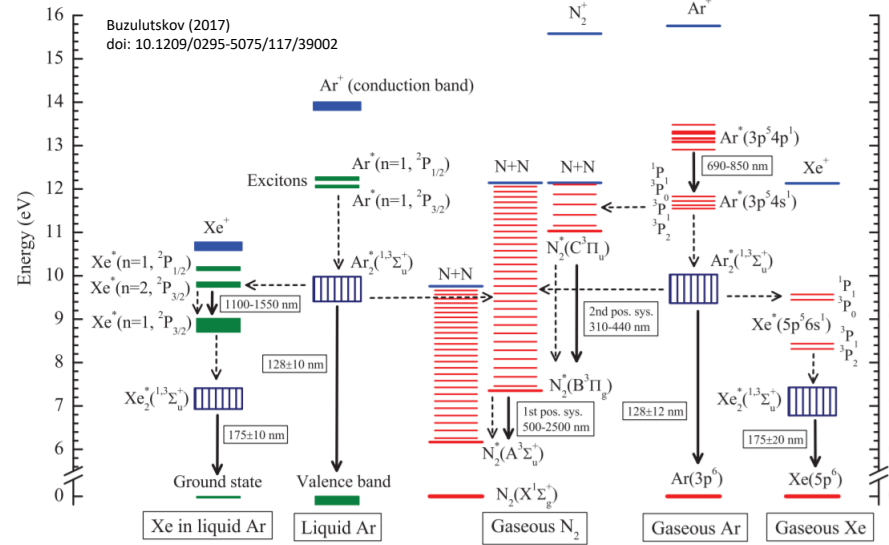
Порог ЭЛ в GAr 4 Тд.

GAr: 4.2 нс, 3.1 мкс. LAr: 7 нс, 1.7 мкс.

- Атомарная электролюминесценция. Только в GAr. $Ar^*(3p^5 4p^1) \rightarrow Ar^*(3p^5 4s^1)$. Излучение 700-850 нм, <100 нс.

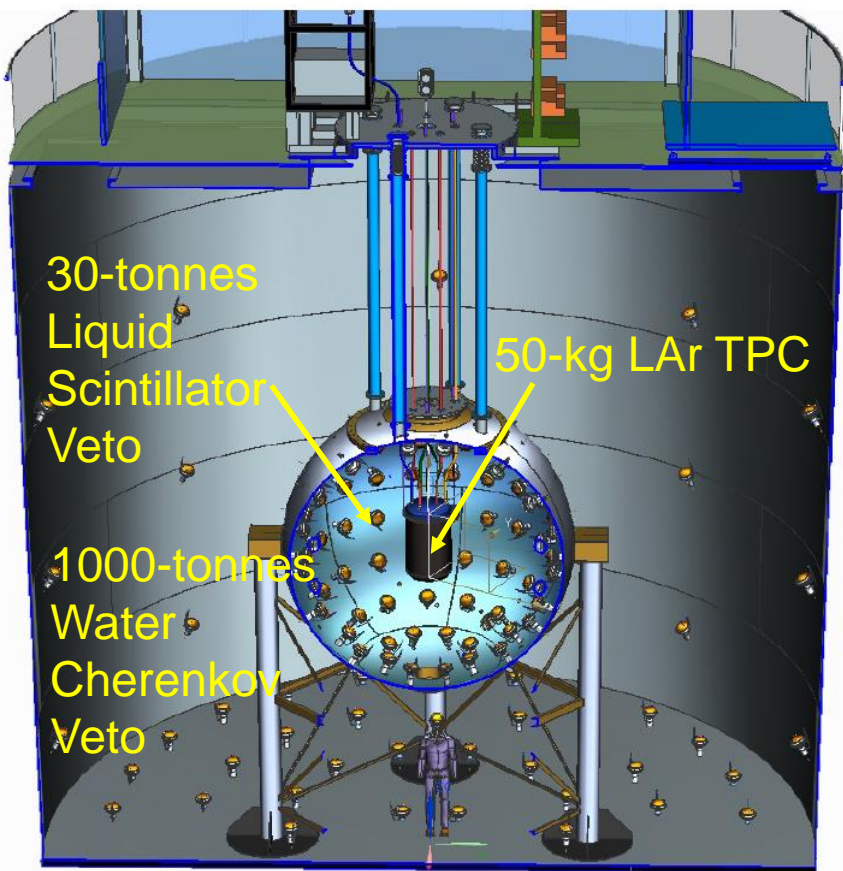
Порог ЭЛ в GAr 5 Тд.

- Механизм тормозного излучения электронов на нейтральных атомах (ТИН). Пока ТИН изучен только в газе. Излучение на одном атоме < 1 пс. Нет порога. Непрерывный спектр.



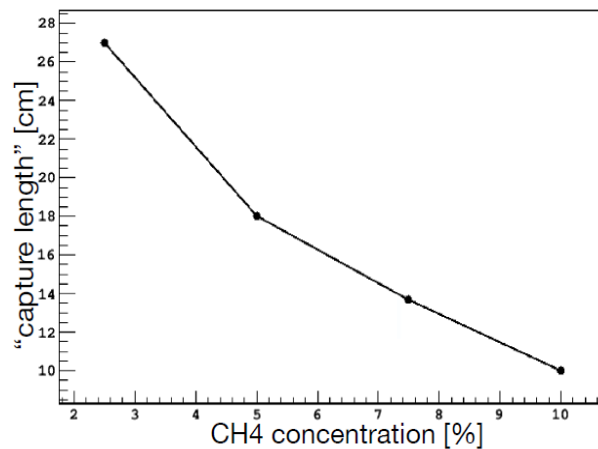
Введение. Первичные сцинтилляции в аргон-метановой смеси.

- Еще одна проблема, возникающая при масштабировании детектора – увеличение массы рабочего вещества вето-детекторов нейтронов, где используются пожароопасные жидкие углеводороды. Для детектора DarkSide-20k хотят найти альтернативу по причинам безопасности.



Детектор DarkSide-50

- Возможная альтернатива - LAr с добавкой CH_4 , где Ar - сцинтиллятор в видимой области, CH_4 – замедлитель нейтронов. Концентрация CH_4 $\geq 1\%$ для эффективного замедления n.
- При использовании LAr двухфазный детектор и нейтронный-вето детектор можно использовать с единым криостатом, что уменьшит долю недетектирующего вещества и уменьшит нейтронный фон в 2-4 раза.
- На данный момент почти отсутствуют данные по первичным сцинтилляциям в видимом и ИК диапазоне в LAr+ CH_4 .



Введение. Цели и задачи.

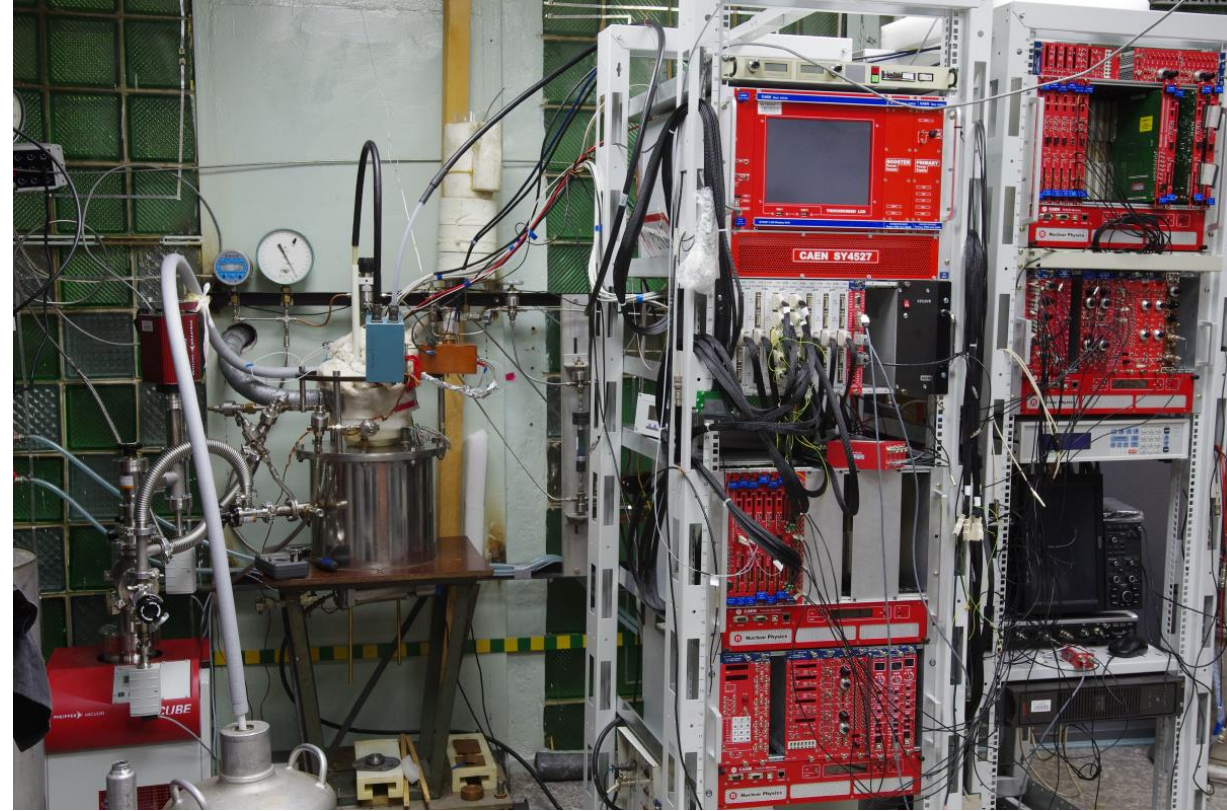
- **Целью** данной работы является исследование электролюминесценции и первичных сцинтилляций в видимом диапазоне при помощи криогенного двухфазного детектора на основе аргона.
1. Разработать двухфазный криогенный детектор на основе аргона, позволяющий зарегистрировать электролюминесценцию при помощи альтернативной схемы считывания в видимом диапазоне.
 2. Исследовать световыход электролюминесценции двухфазного криогенного детектора в зависимости от приложенного электрического поля, оценить пространственное разрешение детектора и энергетический порог регистрации частиц.
 3. Оценить возможность практического применения детекторов с альтернативной схемой считывания.
 4. Разработать двухфазный криогенный детектор для регистрации первичных сцинтилляций в видимом диапазоне.
 5. Исследовать временные характеристики и абсолютный световыход первичных сцинтилляций в видимом диапазоне в зависимости от типа ионизирующего излучения, приложенного электрического поля и содержания примеси метана в жидком аргоне при помощи разных типов фотодетекторов.
 6. Оценить возможность практического применения детекторов с регистрацией первичных сцинтилляций в видимом диапазоне.
- Таким образом, разработка методов оптического считывания в видимом и ближнем ИК диапазоне без использования сместителей спектра может помочь в создании масштабных двухфазных криогенных детекторов на основе аргона для дальнейшего прогресса в изучении темной материи.

Часть 1

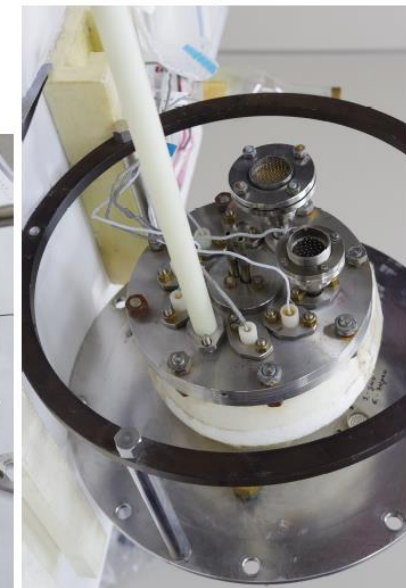
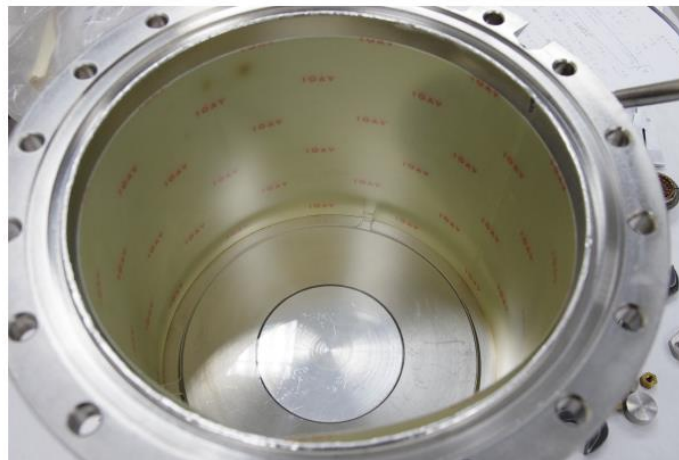
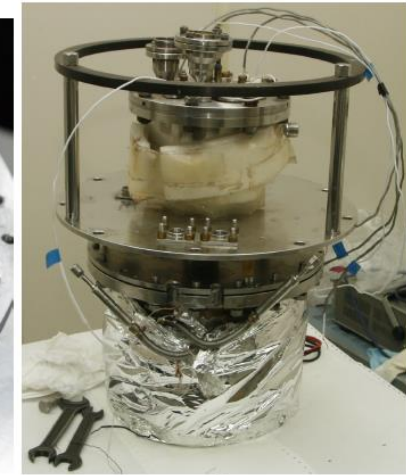
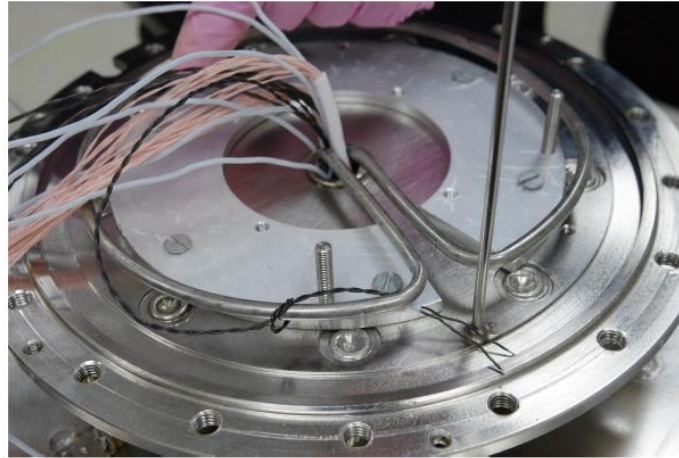
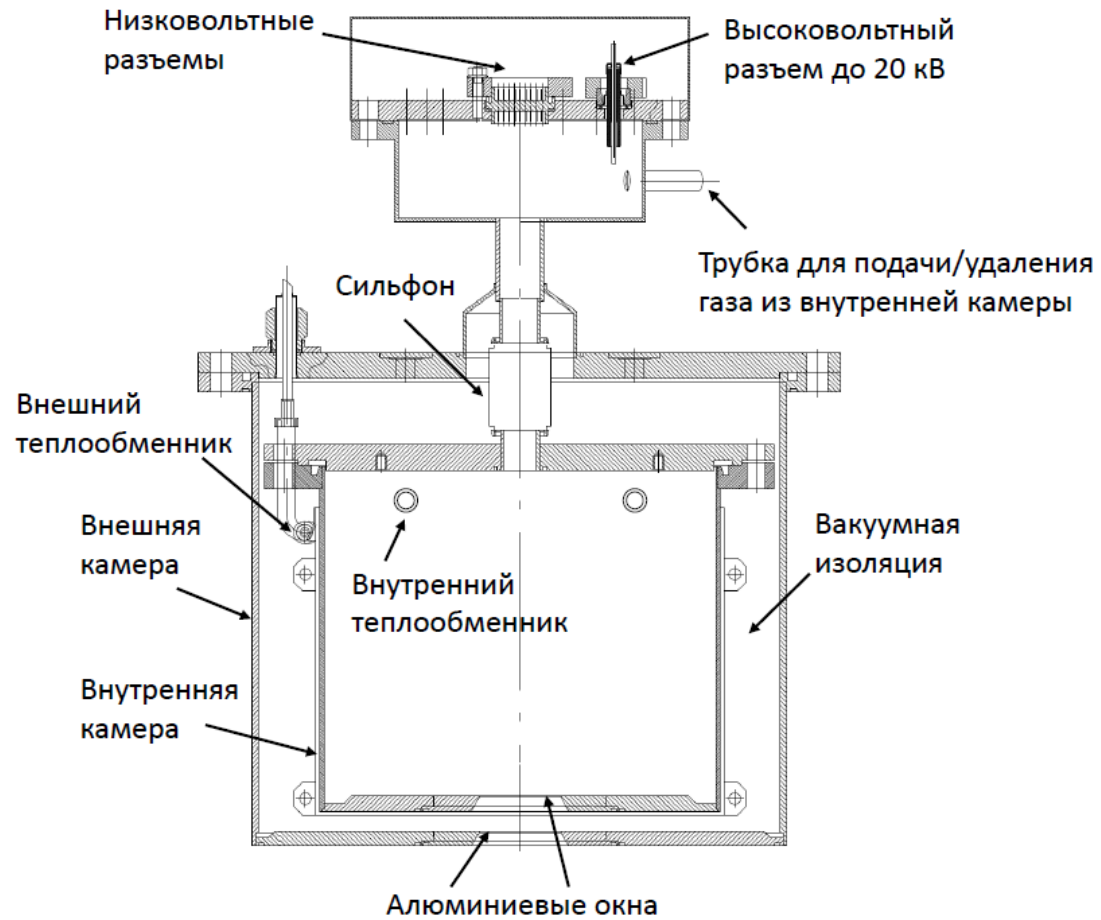
Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка

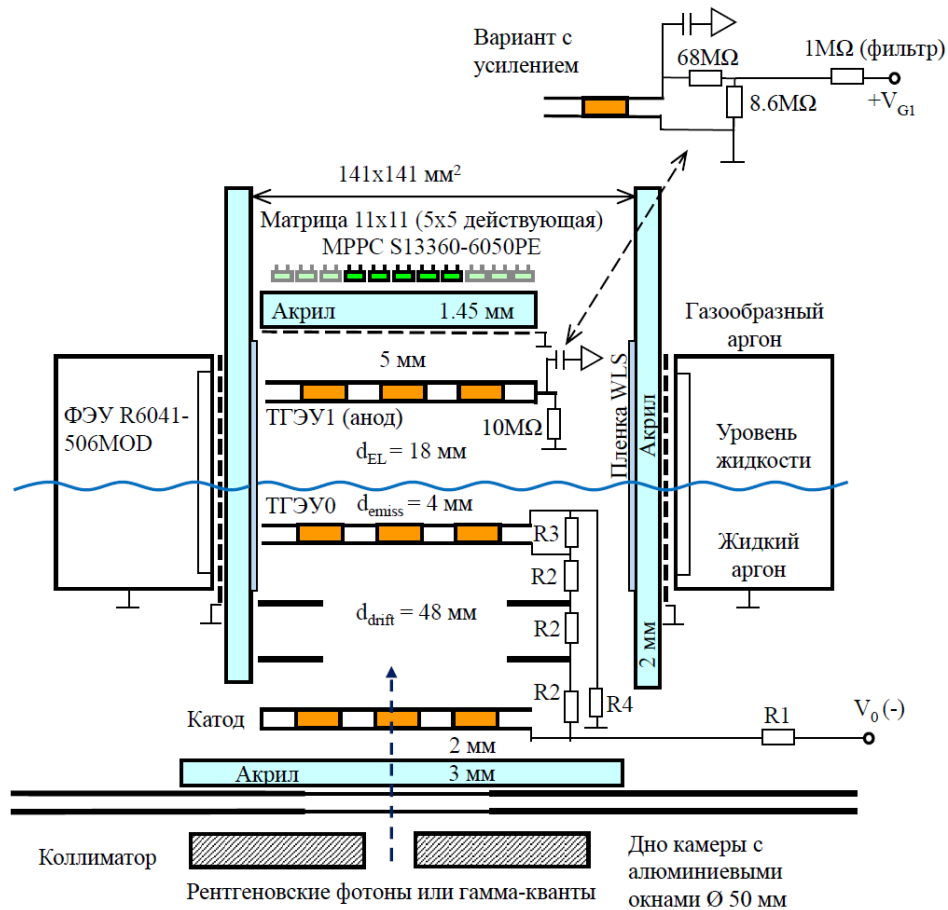
- Экспериментальная установка состояла из нескольких подсистем:
 - криостата, состоящего из внутренней и внешней камеры
 - источников рентгеновского и гамма-излучения
 - криогенно-вакуумной системы
 - системы питания и сбора данных
- В процессе работы использовалось несколько модификаций экспериментальной установки.
 - В первом цикле измерений для изучения электролюминесценции использовался двухфазный криогенный детектор на основе аргона
 - Во втором цикле измерений для изучения первичных сцинтилляций в видимом диапазоне детектор был модифицирован и использовался как в двухфазном, так и однофазном режимах с чистым аргоном и его смесях с метаном (140 ppm - 10%).



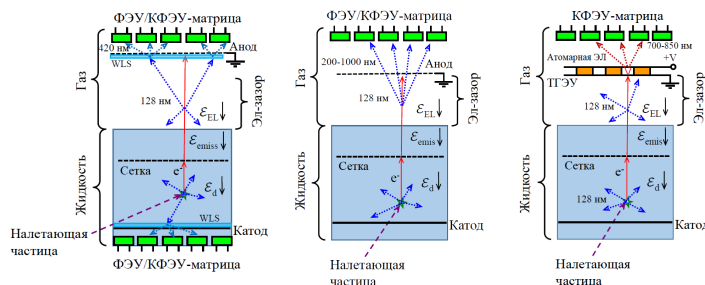
Экспериментальная установка. Криостат.



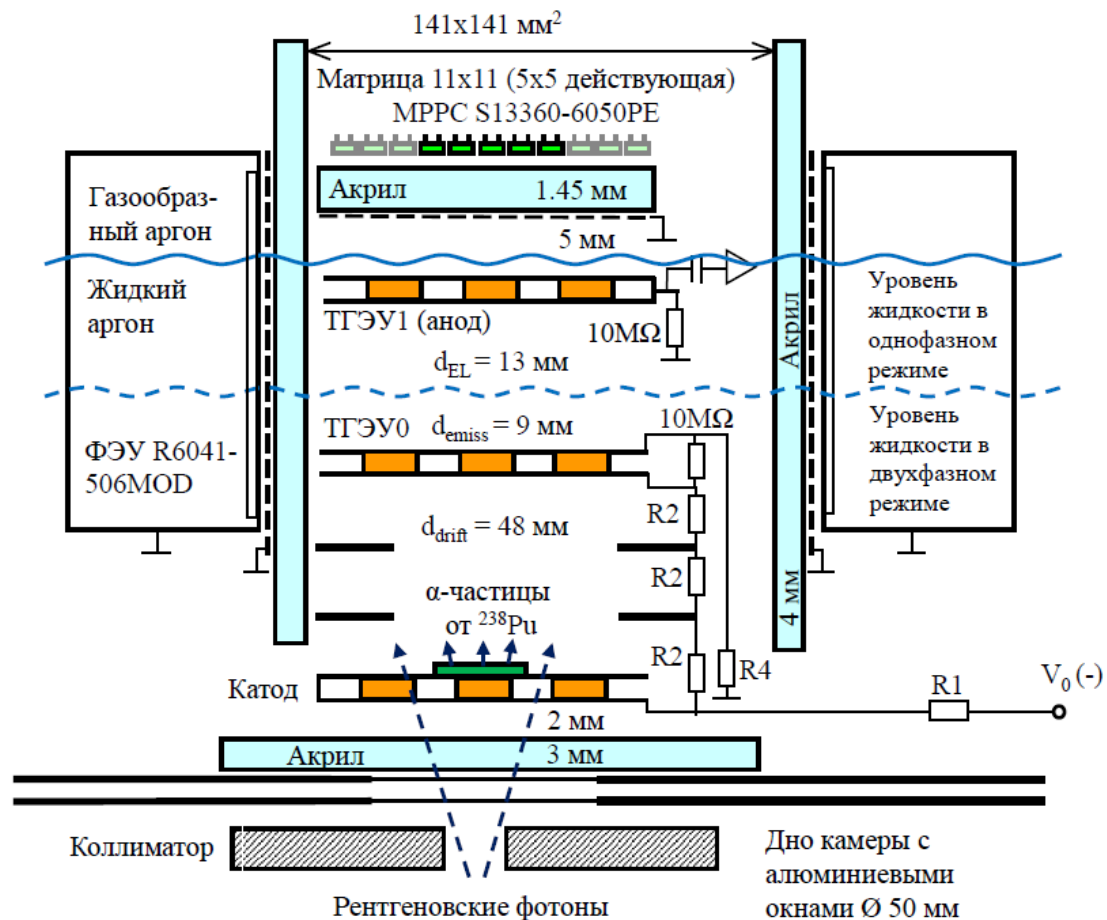
Экспериментальная установка. 1-й цикл измерений.



- Установка представляет детектор, работающий в однофазном (жидкость) или двухфазном (жидкость-газ) режиме при давлении 1.00 ат.
- В нижней части детектора расположен дрейфовый промежуток с низким эл. полем (48 мм), в верхней части расположена область высокого эл. поля (22 мм). Промежутки сформированы при помощи ТГЭУ.
- Нижняя часть детектора облучалась импульсной рентгеновской трубкой (со средней энергией X-rays 25 кэВ) или гамма-квантами с энергиями 22-88 кэВ от источника ¹⁰⁹Cd через коллиматор диаметром 2 или 14 мм.
- При регистрации частиц записывался как зарядовый сигнал, собираемый на ТГЭУ1, так и световой сигнал, собираемый на ФЭУ и КФЭУ-матрицу.
- Реализованы три схемы считывания:
 - ЗРМТ+WLS
 - Прямое считывание на КФЭУ-матрицу
 - Считывание на умножитель ТГЭУ/КФЭУ-матрица



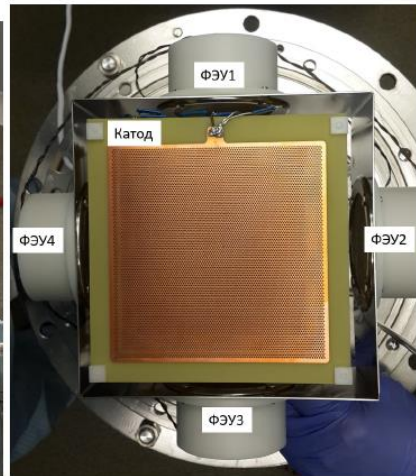
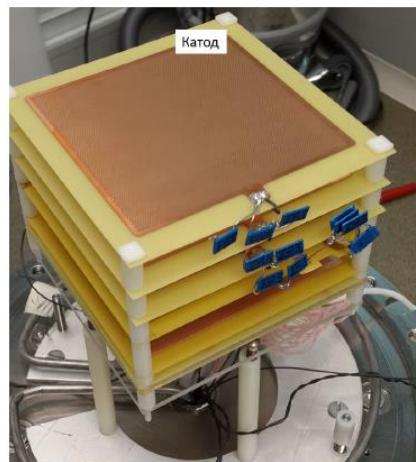
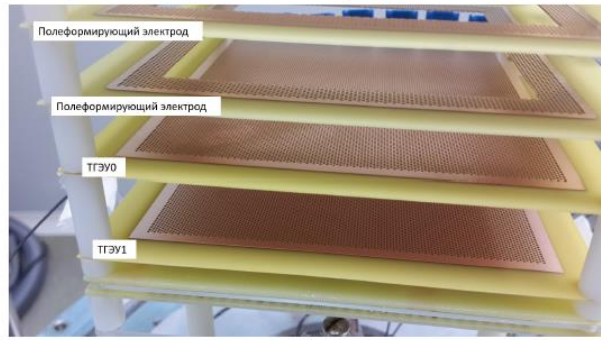
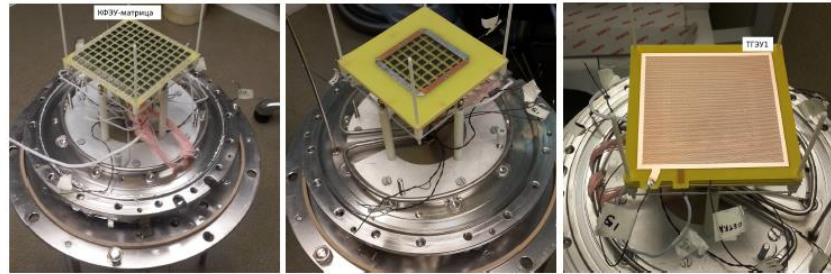
Экспериментальная установка. 2-й цикл измерений.



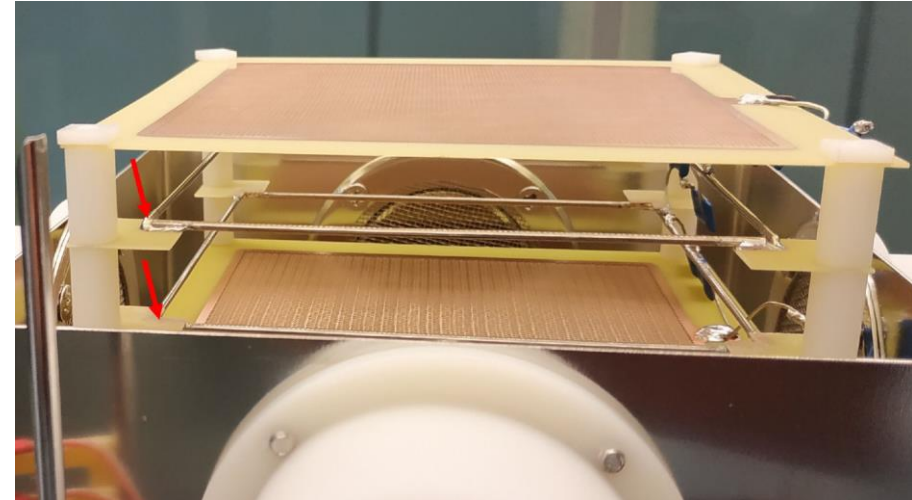
- Во втором цикле измерений изучались первичные сцинтилляции в видимом диапазоне в чистом жидком аргоне и его смесях с метаном.
- ТГЭУ0 и ТГЭУ1 были заменены, что увеличило оптическую прозрачность (в норм. напр. света) с 28% до 75%.
- Установлен новый короб из ПММА без ТФБ, чтобы не регистрировать переизлученный ВУФ.
- Полеформирующие электроды из ТГЭУ были заменены на электроды из стальной проволоки, что существенно увеличило светосбор сигнала S1 на сборку ФЭУ.
- По центру катода был установлен альфа-источник ^{238}Pu с энергией частиц 5.5 МэВ.
- В измерениях с рентгеновской трубкой использовался внешний запуск и криогенный детектор работал в однофазном режиме.
- В измерениях с альфа-частицами использовался самозапуск по сигналу S2, поэтому криогенный детектор работал в двухфазном режиме.

Экспериментальная установка. Сборка детектора.

Первый цикл измерений

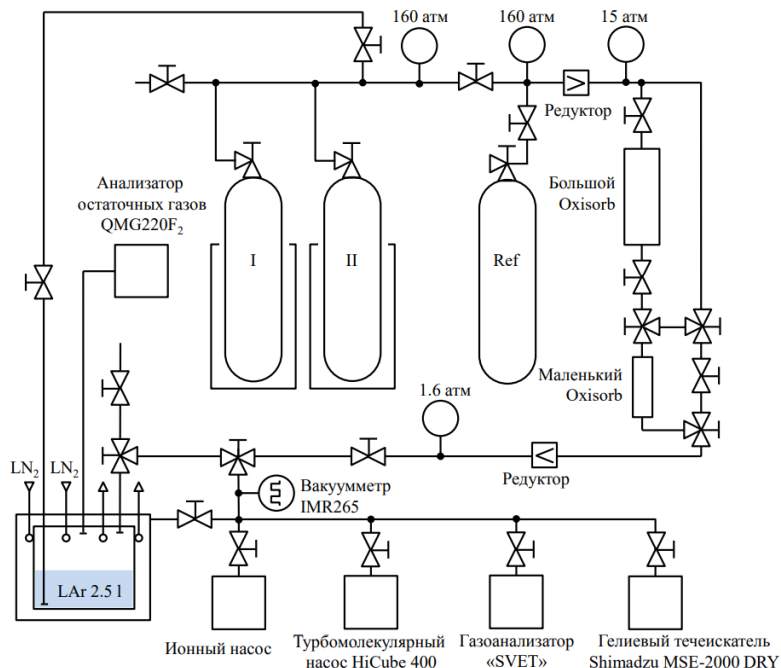


Второй цикл измерений



Экспериментальная установка. Криогенно-вакуумная система.

- Для измерений использовался аргон с начальной чистотой 99.9998% и метан с начальной чистотой 99.95%.
- В начале каждого сеанса измерений криогенная камера откачивалась и заполнялась чистым аргоном. Процедура повторялась несколько раз.
- Далее газовая смесь из баллона из нержавеющей стали объемом 40 литров пропусклась через фильтр Oxisorb для очистки от электроотрицательных примесей и затем сжижалась в криогенную камеру. Благодаря очистке содержание O_2 и H_2O снижалось до нескольких ppb, что соответствует времени жизни электронов в чистом аргоне >100 мкс.
- По окончании сеанса содержимое криогенной камеры собиралось обратно в баллон с газовой смесью, путем охлаждения баллона жидким азотом.

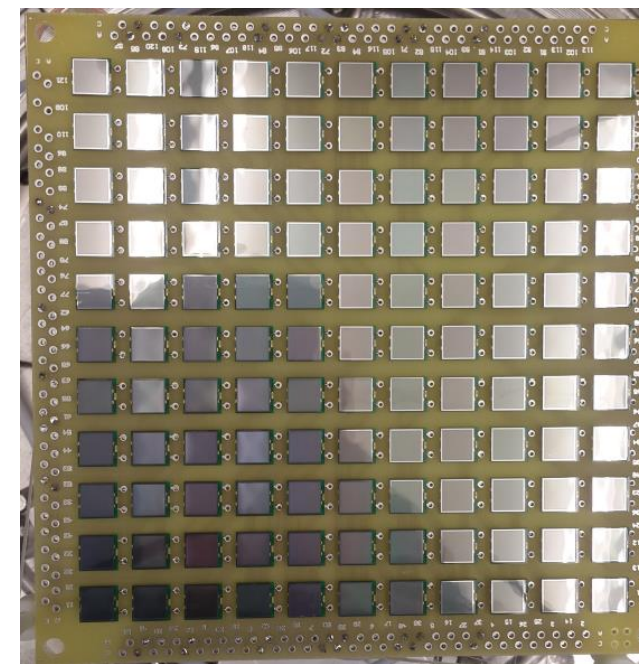
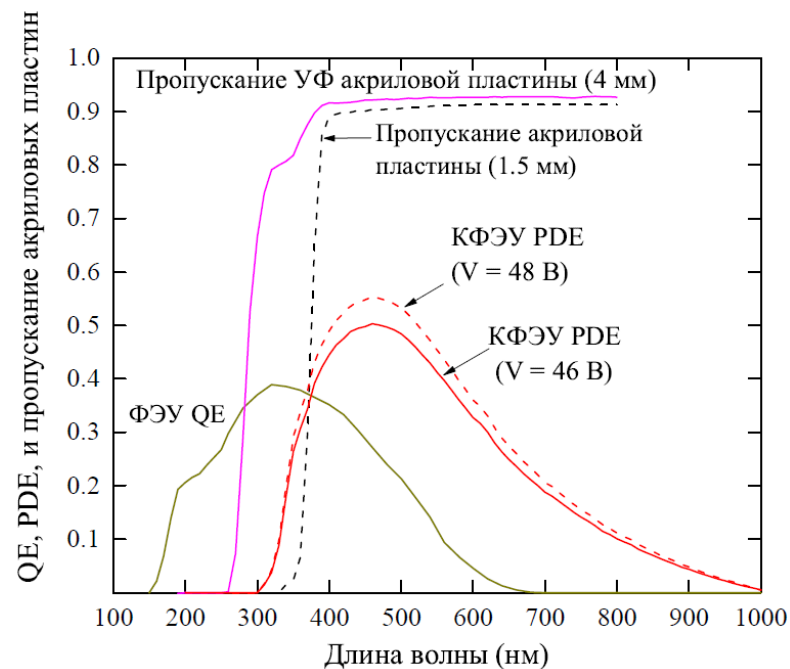
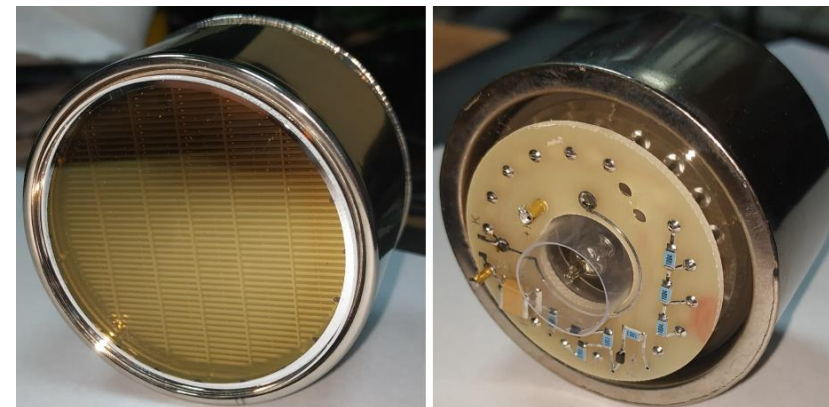


	Баллон с Ar	Баллон с CH ₄
N ₂	< 0.8 ppb	< 200 ppb
Углеводороды	< 0.1 ppb	-
Углеводороды (кроме CH ₄)	-	< 200 ppb
CO ₂	< 0.1 ppb	< 10 ppb
CO	-	< 5 ppb
O ₂	< 0.5 ppb	< 10 ppb
H ₂ O	< 0.5 ppb	< 10 ppb
Всего	< 2 ppb	< 500 ppb

- Контроль содержания примесей в чистом аргоне газоанализатором «СВЕТ»; [N₂] < 1 ppb.

Экспериментальная установка. Сборка ФЭУ и КФЭУ-матрица.

- Сборка ФЭУ состояла из четырех одинаковых криогенных ФЭУ R6041-506MOD производства Hamamatsu.
 - Скорость счета шумов $< 50 \text{ с}^{-1}$
 - Усиление $3 \times 10^6 - 7 \times 10^6$ в зависимости от ФЭУ
- Матрица размером 11×11 элементов с шагом каналов 1 см была составлена из MPPC 13360-6050PE Hamamatsu.
 - 50 мкм пиксель, 14400 пикселей/КФЭУ, коэффициент заполнения активной области 74%, $V_{BD} = 42.1 \text{ В}$



Экспериментальная установка. Источники ионизирующего излучения.

- Источник ^{238}Pu : подложка из нержавеющей стали $d=24$ мм и $h=2$ мм, на которую тонким слоем на области диаметром 11.5 мм был нанесен активный материал, содержащий ^{238}Pu . Активность 5×10^4 Бк, альфа-частицы 5.5 МэВ.
- Рентгеновская трубка (0,11BSV7-Mo) с Mo анодом, $U=40$ кВ, $I=2.5$ мА, 240 Гц. Импульсный режим был реализован при помощи запирающей сетки, управляемой генератором импульсов.
- Источник ^{109}Cd на момент измерений имел активность около 0.5×10^8 Бк. В спектре линии W из-за подложки.

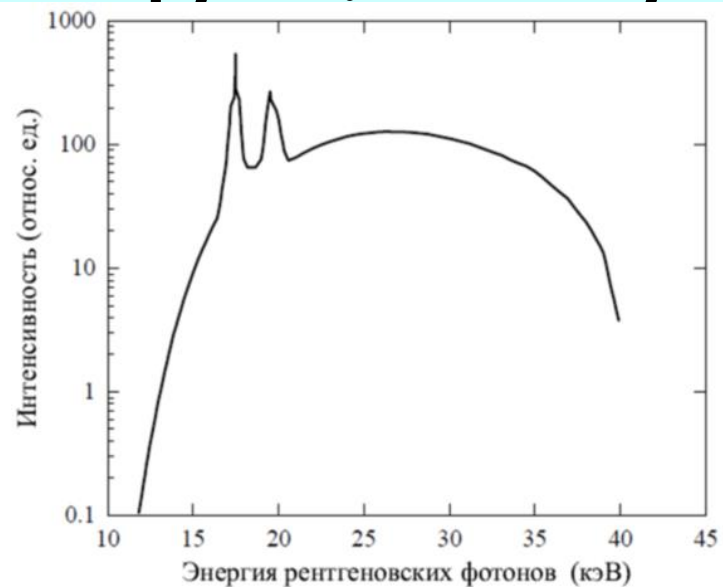


Рисунок 2.15 — Вычисленный энергетический спектр рентгеновских фотонов после прохождения излучения от рентгеновской трубки через алюминиевые окна суммарной толщиной 2 мм [101]

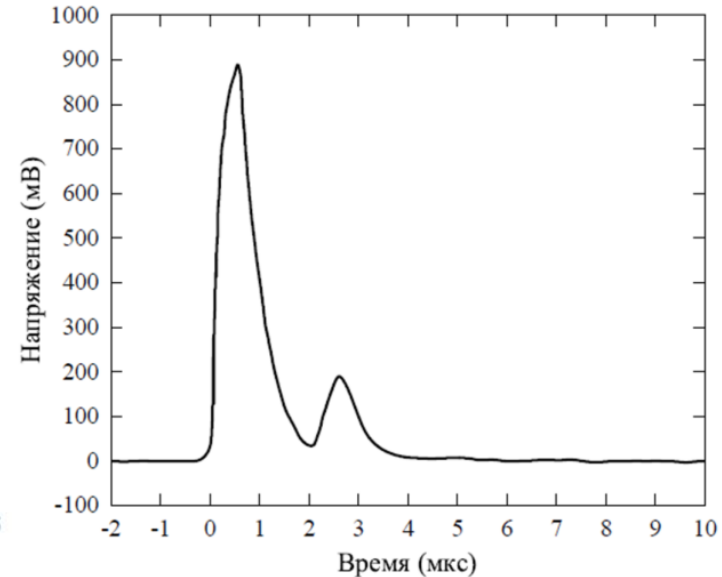
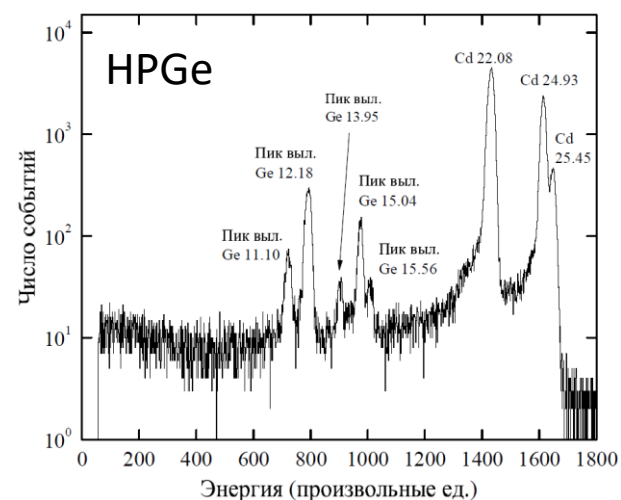
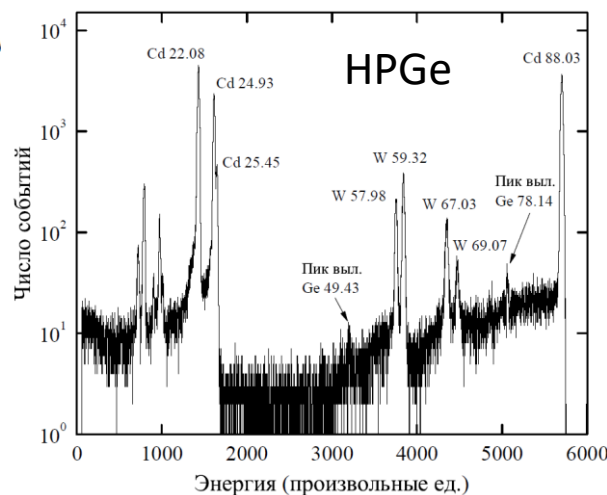
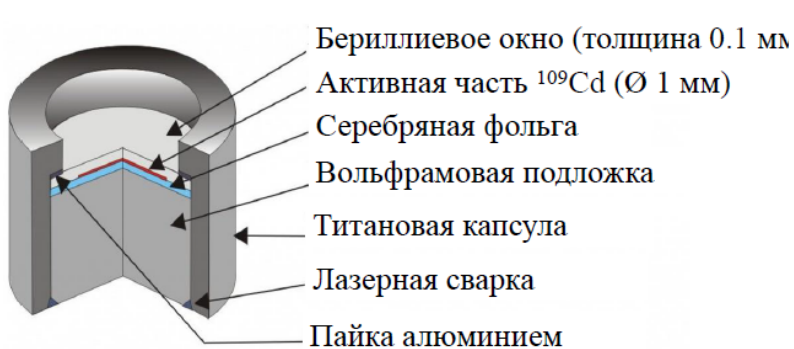


Рисунок 2.17 — Сигнал, записанный счетчиком на основе сцинтиллятора BGO при регистрации рентгеновского излучения от трубки [37]



22–25 кэВ

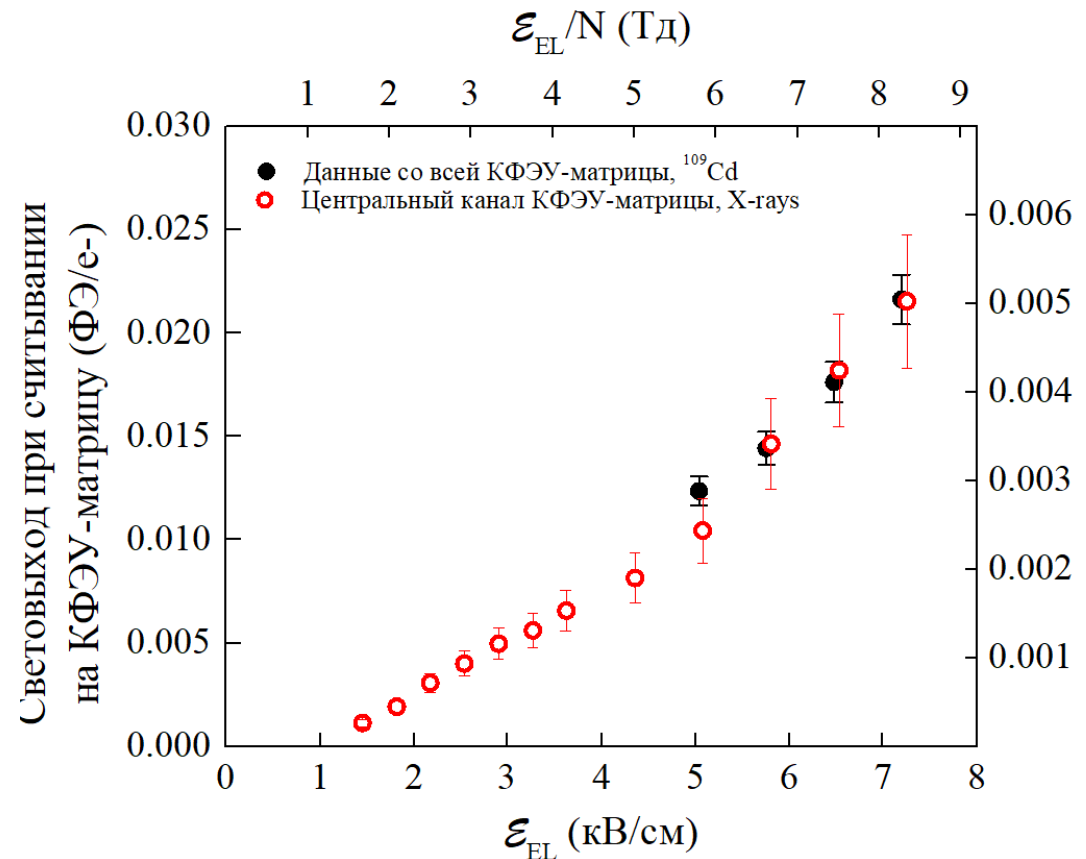
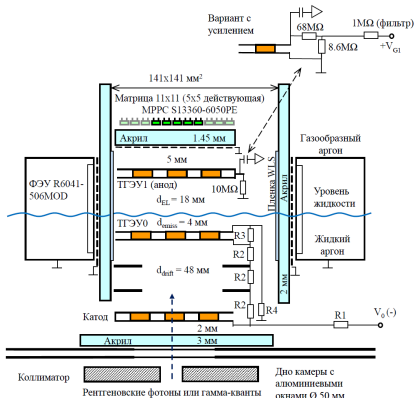
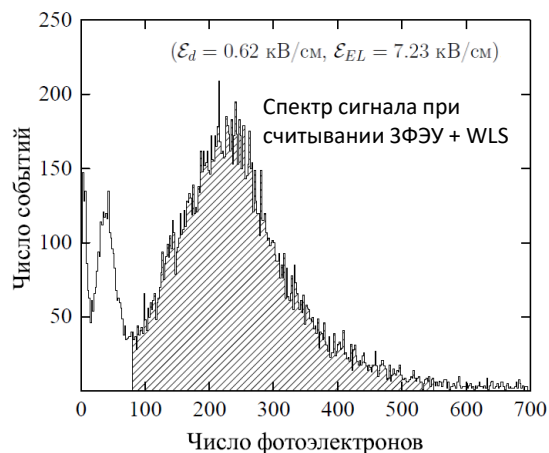
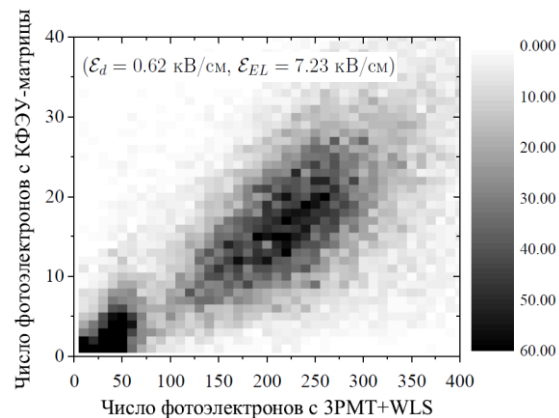
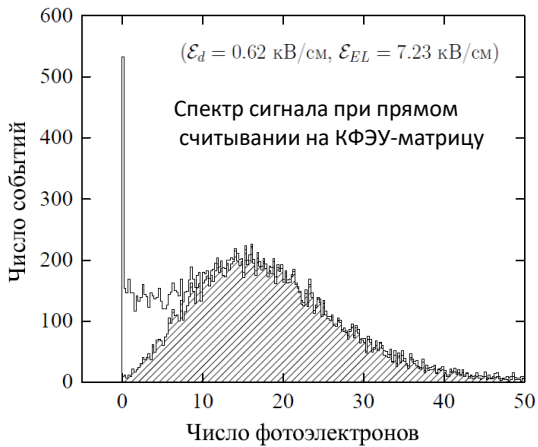
59–88 кэВ

Часть 2

**Считывание двухфазных аргоновых
детекторов на КФЭУ-матрицу, используя
электролюминесценцию в видимом и
ближнем инфракрасном диапазоне**

ЭЛ в видимом и ИК диапазоне. Прямое считывание на КФЭУ-матрицу.

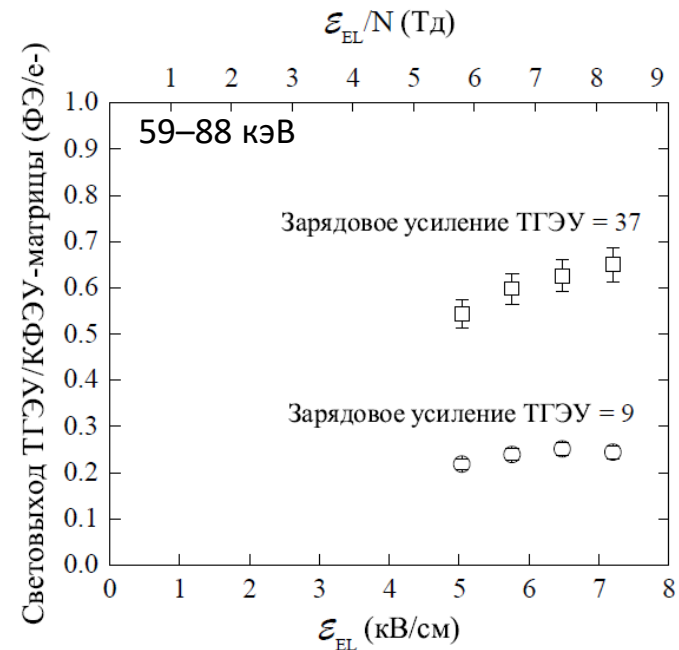
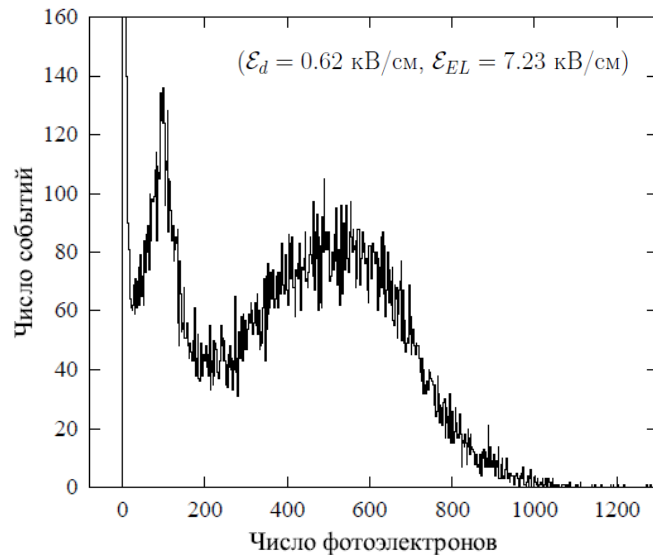
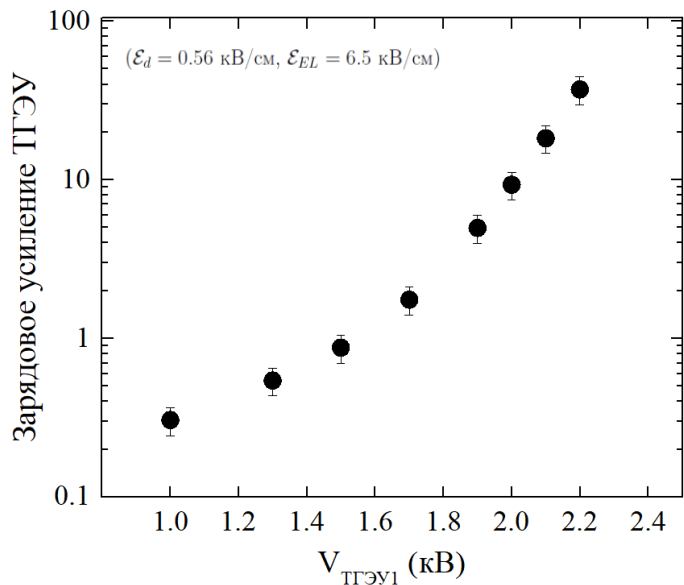
- Для измерений использовался источник ^{109}Cd . Число ФЭ на КФЭУ-матрице было найдено для максимального поля в детекторе для высокой энергии гамма-квантов (59–88 кэВ, 82 кэВ сред.).
- Заряд, эмитированный из жидкости в газ был слишком мал для прямого измерения и был рассчитан теоретически.
- Максимальный световой выход ЭЛ-зазора составил 0.022 ФЭ/е– при электрическом поле в ЭЛ-зазоре 7.23 кВ/см.



Световой выход при считывании на центральный канал КФЭУ-матрицы (ФЭ/е-)

ЭЛ в видимом и ИК диапазоне. Считывание на ТГЭУ/КФЭУ-матрицу.

- Здесь ТГЭУ1 работал в режиме электронной лавины. Вначале было измерено зарядовое усиление ТГЭУ1 с помощью импульсной рентгеновской трубки. ТГЭУ используется как электролюминесцентный усилитель.
- Световыход комбинированного умножителя ТГЭУ/КФЭУ-матрица был измерен при двух напряжениях ТГЭУ1, 2.0 и 2.2 кВ, что соответствует зарядовому усилению ТГЭУ1 9 и 37 соответственно, используя источник ^{109}Cd .
- Максимальный световыход ТГЭУ/КФЭУ-матрицы составил 0.65 ФЭ/е– при зарядовом усилении 37 и электрическом поле в ЭЛ-зазоре 7.23 кВ/см.

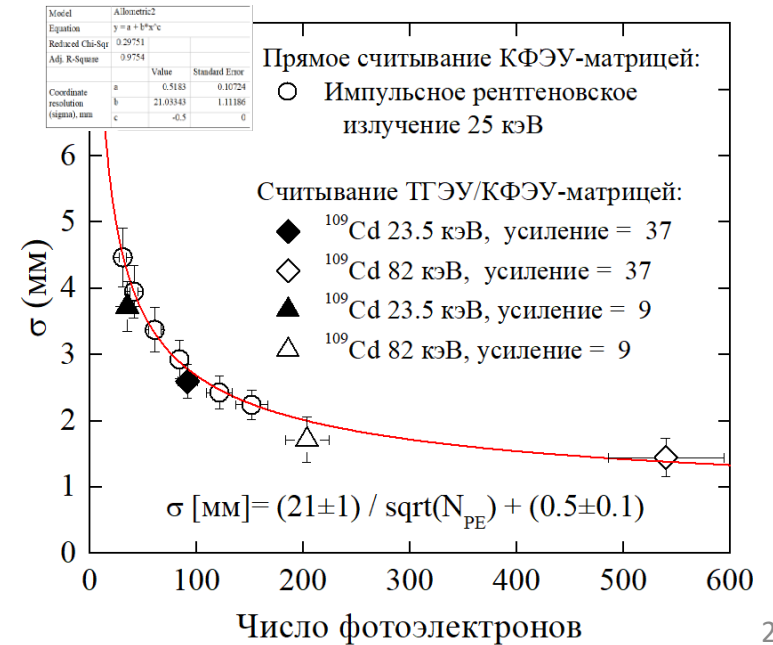
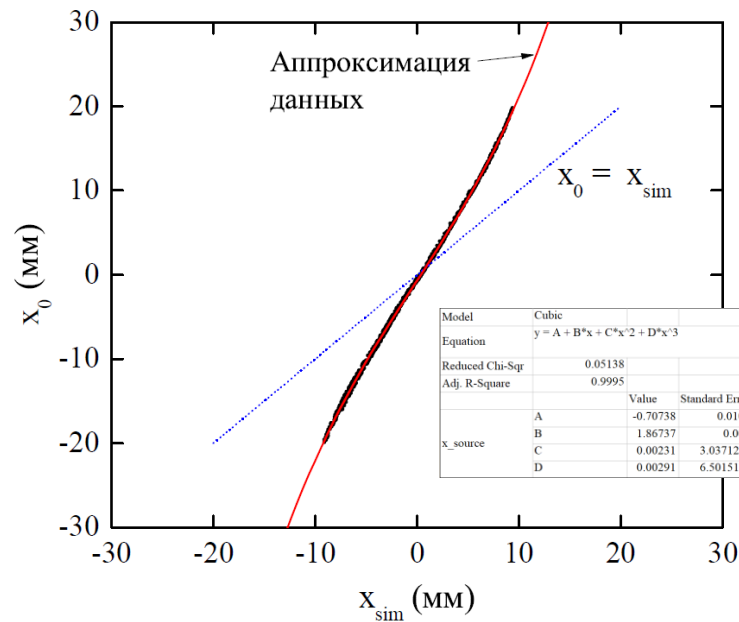
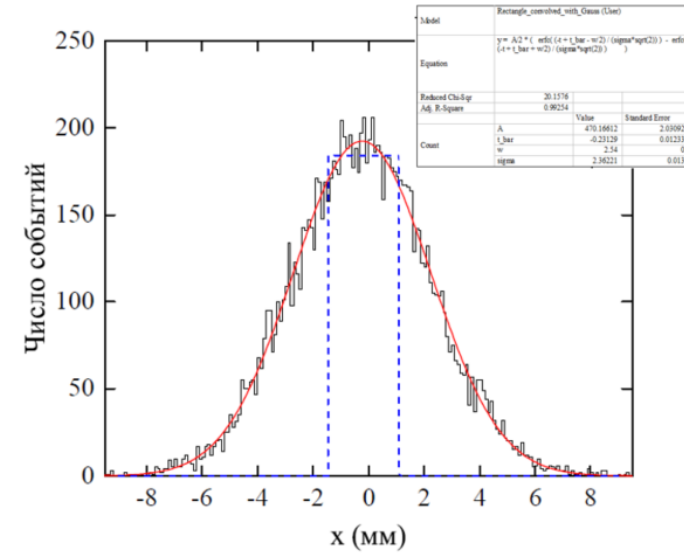
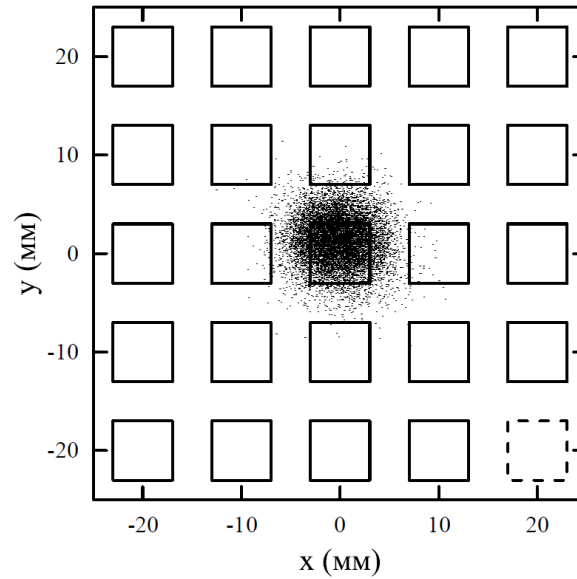
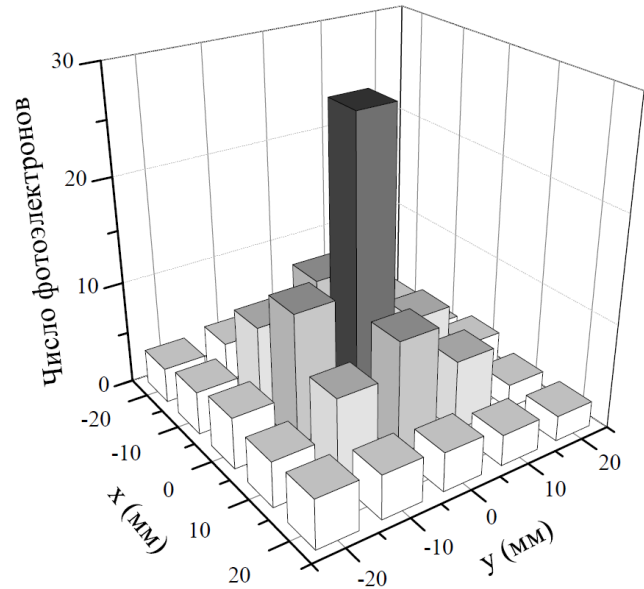


ЭЛ в видимом и ИК диапазоне. Реконструкция координат.

$$x_{exp} = \left(\sum_{i=1}^{N_{ch}} X_i \cdot N_i \right) / \left(\sum_{i=1}^{N_{ch}} N_i \right)$$

$$N_i(x_0, y_0) = N_0 \cdot LRF_i(X_i - x_0, Y_i - y_0)$$

LRF при прямом считывании на КФЭУ-матрицу, X-rays



ЭЛ в видимом и ИК диапазоне. Оценка порогов регистрации.

- Порог регистрации определяется как минимальная энергия, выделяемая рассеянной частицей в жидком благородном газе, которая может быть зарегистрирована детектором.
- В данной работе были получены световыходы
 - 0.022 ФЭ/е⁻ для прямого считывания на КФЭУ-матрицу
 - 0.65 ФЭ/е⁻ для считывания на ТГЭУ/КФЭУ-матрицу
- В оптимальной конфигурации можно добиться
 - 0.5 ФЭ/е⁻ для прямого считывания на КФЭУ-матрицу (при поле в ЭЛ-зазоре 8.4 Тд)
 - 1.6 ФЭ/е⁻ при считывании на ТГЭУ/КФЭУ-матрицу (при зарядовом усилении 37)
- Порог регистрации сигнала S_2 зависит в первую очередь от числа ФЭ. Возьмем порог в 10 ФЭ. Тогда можно ожидать координатное разрешение ~ 1 см и энергетическое разрешение $\sim 30\%$.

- Зная световыход ЭЛ и число ФЭ, были оценены пороги регистрации в е⁻.
- Используя данные по ионизационному выходу электронов (10 е⁻/кэВ) и ядер отдачи (3.6 е⁻/кэВ) были вычислены энергетические пороги.

Концепция считывания	Порог регистрации для 10 ФЭ			Световыход ЭЛ-зазора (ФЭ/е ⁻)
	(е ⁻)	(кэВ _{ee})	(кэВ _{nr})	
Прямое считывание на КФЭУ-матрицу (толщина ЭЛ-зазора 1.8 см, $\mathcal{E}_{EL}/N = 8.4$ Тд)	20	2	5.6	0.5
Считывание на ТГЭУ/КФЭУ-матрицу (зарядовое усиление ТГЭУ = 37)	6.2	0.6	1.7	1.6

ЭЛ в видимом и ИК диапазоне. Обсуждение.

- Полученные значения могут быть использованы для оценки практического применения альтернативных схем считывания.
 - Порог для прямого считывания на КФЭУ-матрицу составляет порядка 6 кэВ_{nr} , что достаточно для поиска WIMP с массой выше $10 \text{ ГэВ}/c^2$.
 - Для считывания на ТГЭУ/КФЭУ-матрицу порог в три раза ниже, порядка 2 кэВ_{nr} , что уже близко к порогу регистрации в эксперименте DarkSide-50, где получен предел на сечение для масс WIMP в несколько $\text{ГэВ}/c^2$.
- Для регистрации WIMP малой массы (менее $1 \text{ ГэВ}/c^2$) детектор должен обладать минимально возможным энергетическим порогом, достичь которого не так просто при использовании альтернативных схем считывания.
- Однако детектор с альтернативными схемами считывания вполне может использоваться для регистрации частиц в случае большого энерговыделения. Например, для регистрации солнечных нейтрино с энерговыделением $\sim 1 \text{ МэВ}$.

Концепция считывания	Порог регистрации для 10 ФЭ			Световой выход ЭЛ-зазора (ФЭ/ e^-)
	(e^-)	(кэВ_{ee})	(кэВ_{nr})	
Прямое считывание на КФЭУ-матрицу (толщина ЭЛ-зазора 1.8 см, $\mathcal{E}_{EL}/N = 8.4 \text{ Тд}$)	20	2	5.6	0.5
Считывание на ТГЭУ/КФЭУ-матрицу (зарядовое усиление ТГЭУ = 37)	6.2	0.6	1.7	1.6

Часть 3

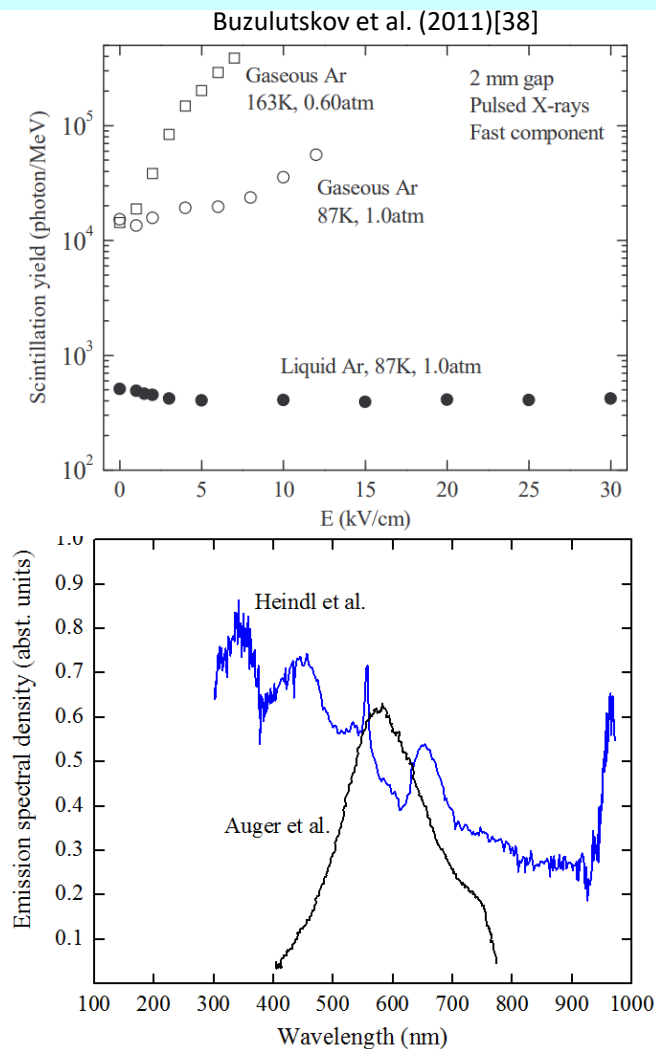
Изучение первичных сцинтилляций в видимом диапазоне в чистом жидком аргоне

Изучение первичных сцинтилляций в LAr. Обзор.

- Доминирующим механизмом первичных сцинтилляций в LAr является эксимерный механизм, обладающий высоким фотонным выходом 10000 – 50000 фотон/МэВ. [<https://doi.org/10.1088/1748-0221/8/04/R04001>]
- Есть указания на регистрацию в жидком аргоне первичного излучения в видимом и ближнем ИК диапазонах и интенсивностью порядка 500 фотон/МэВ [38]. Механизм такого излучения до сих пор не ясен. Возможно, ТИН.

Данные с источником e-/гамма-квантов/X-rays:

- В работе Heindl et al. 2010 г. был получен спектр излучения при облучении LAr 12 кэВ e⁻. [36,37]
- Используя спектр из Heindl et al., в нашей работе 2011 г. был оценен световыход сцинтилляций, составивший около 500 фотон/МэВ. [38,39,40]
- Однако затем в работе Neumeier et al. 2014 г. не обнаружили излучение в диапазоне 500-3500 нм. [46]
- В работе Alexander et al. 2016 г. было зарегистрировано излучение с быстрой и медленной компонентами в диапазоне 715–900 нм. [42]
- В работе Auger et al. 2016 г. был измерен спектр излучения в LAr при пробое (U=56кВ, 3мм). [43]



[36] <https://doi.org/10.1209/0295-5075/91/62002>

[37] <https://doi.org/10.1088/1748-0221/6/02/P02011>

[38] <https://doi.org/10.1209/0295-5075/94/52001>

[39] <https://doi.org/10.1088/1748-0221/7/06/P06015>

[40] <https://doi.org/10.1088/1748-0221/7/06/P06014>

[42] <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/03/C03010>

[43] <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/03/P03017>

[46] <https://doi.org/10.1209/0295-5075/106/32001>

Изучение первичных сцинтилляций в LAr. Обзор.

Еще меньше данных получено при облучении LAr альфа-частицами:

- В работе Jones et al. 2015 г. в LAr не было обнаружено излучение в видимом диапазоне (300–650 нм). По оценкам, интенсивность <10 фот./МэВ. [47]
- В работе Escobar et al. 2018 г. наблюдали излучение в ИК диапазоне (715–900 нм), но световыход не был измерен. [45]

Таким образом, ситуация довольно запутанная, т.к. данные по первичным сцинтилляциям в видимом диапазоне были получены с разными источниками ионизации и в разном спектральном диапазоне.

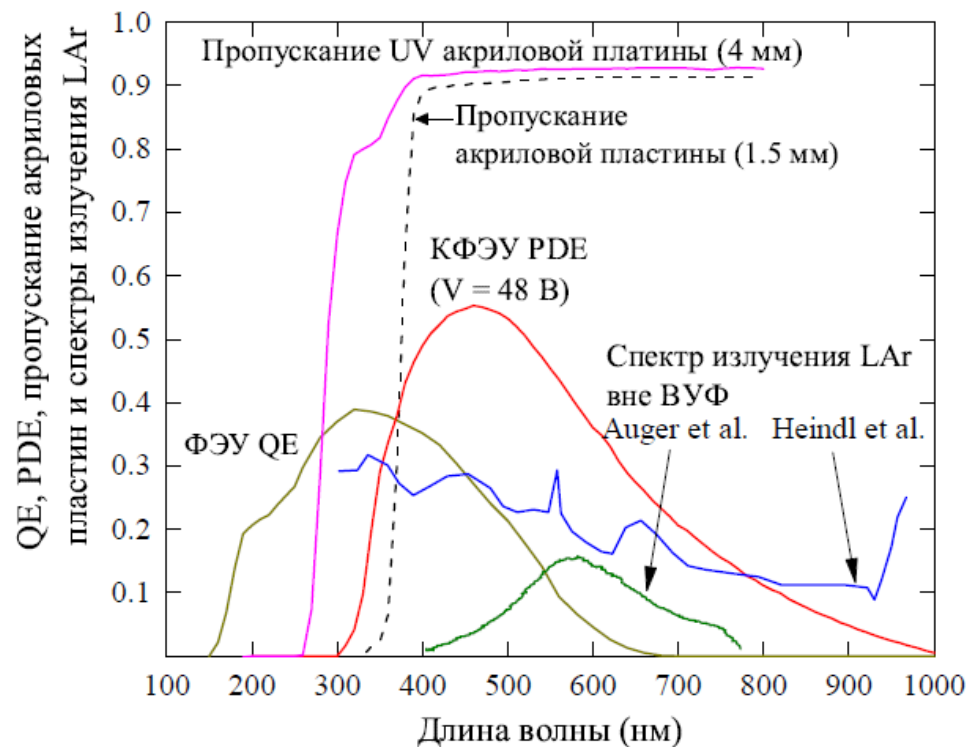
Ни в одной из работ не приведены одновременно данные по зависимости световыхода от эл. поля, по спектру излучения и временной структуре сигнала. Это существенно усложняет понимание механизма излучения.

[45] <https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/03/C03031>

[47] <https://doi.org/10.1088/1748-0221/8/12/P12015>

Изучение первичных сцинтилляций в LAr. Спектры.

- Изучение первичных сцинтилляций проводилось во втором цикле измерений на модифицированной установке.

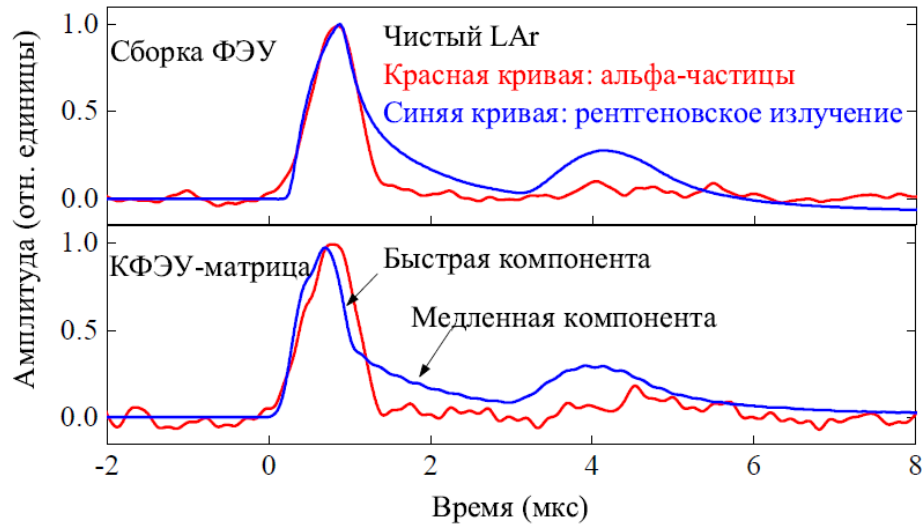


- В работах Heindl et al. [37] и Auger et al.[43] были измерены спектры излучения жидкого аргона в видимом диапазоне.
- Учитывая приведенные спектральные зависимости, ФЭУ и КФЭУ будут чувствительны к излучению жидкого аргона в видимом диапазоне.

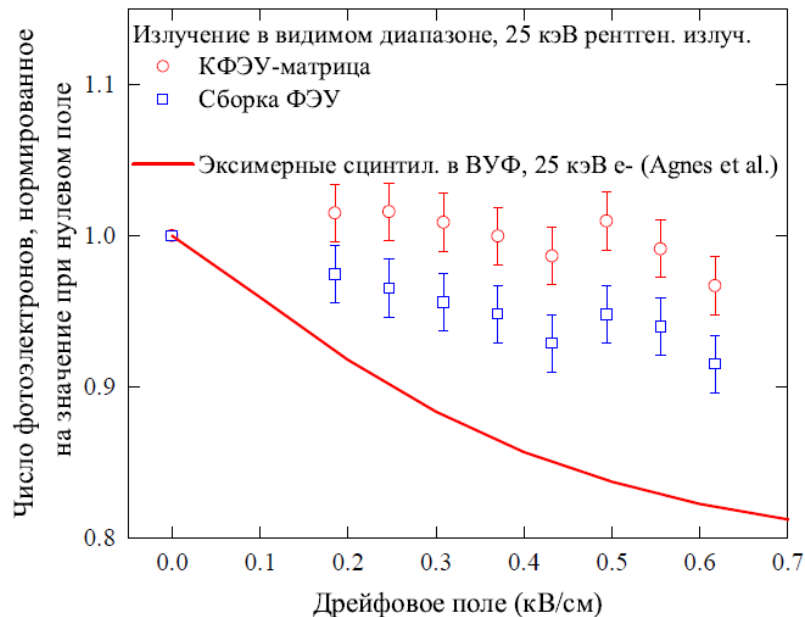
[37] <https://doi.org/10.1088/1748-0221/6/02/P02011>

[43] <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/03/P03017>

Изучение первичных сцинтилляций в LAr. Форма сигнала и влияние эл. поля.



- Сигнал S1 от X-rays имеет два пика – особенность рентгеновской трубки.
- Сигнал S1 от X-rays имеет быструю (<100 нс) и медленную (~1 мкс) компоненты.
- Сигнал S1 от альфа-частиц - только быструю компоненту.
- Форма сигнала S1 не зависела от электрического поля в детекторе - это указывает на отсутствие влияния сигнала S2 на измерение характеристик первичных сцинтилляций.



- Для X-rays при нулевом электрическом поле было зарегистрировано 33 ФЭ на КФЭУ-матрицу и 40 ФЭ на сборку ФЭУ.
- Для сравнения показан относительный световыход эксимерных (ВУФ) сцинтилляций, вызванный электронами с энергией 25 кэВ.
- Это различие указывает на разные механизмы излучения в видимом диапазоне и эксимерных сцинтилляций в ВУФ.

Изучение первичных сцинтилляций в LAr. Энерговыделение.

- Для расчета абсолютного световыхода первичных сцинтилляций необходимо знать энергию, выделенную в жидком аргоне.
- При измерениях с ^{238}Pu были отобраны события только с одной альфа-частицей по спектру сигнала S2.
- При измерениях с X-rays регистрируется множество гамма-квантов.

$$E_{dep} = N_i \cdot W$$

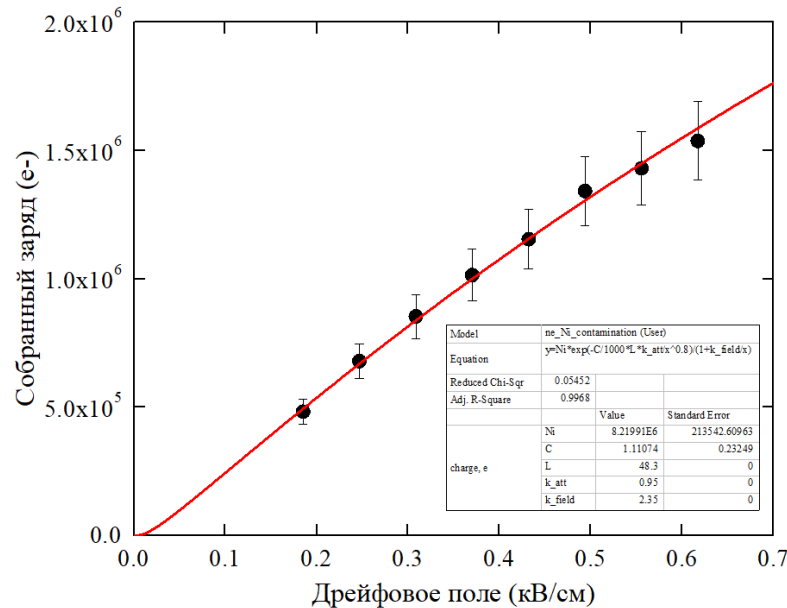
$$N_{coll} = N_i \cdot \frac{T_e \cdot \exp(-K_{att} \cdot C \cdot X)}{1 + k_{rec}/F}$$

$$k_{rec} [\text{V/cm}] = 485 + 47000/E[\text{keV}]$$

$$K_{att} = 0.95/F^{0.8}$$

$$W = 23.6 \text{ eV}$$

N_i, C – свободные параметры



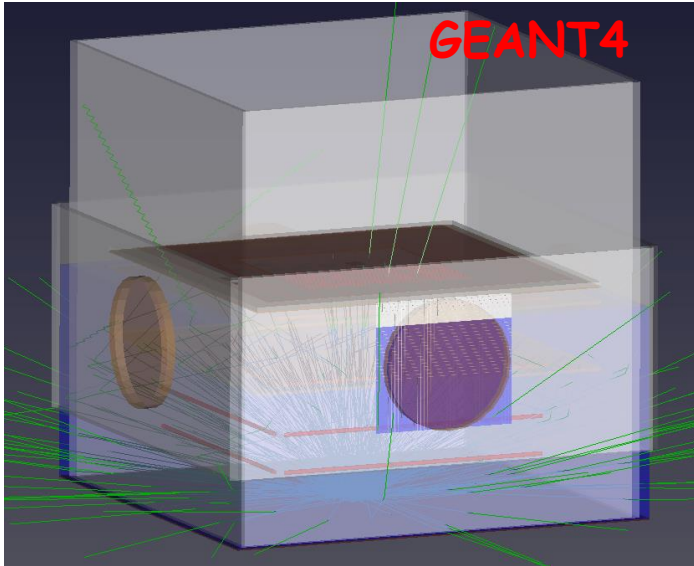
$$N_i = (7.9 \pm 1.1) \times 10^6 \text{ e}^-$$

$$C = 2 \pm 0.8 \text{ ppb}$$

- $E_{dep} = 186 \text{ МэВ}$ (7500 X-rays с $\langle E \rangle = 25 \text{ кэВ}$).

Изучение первичных сцинтилляций в LAr. Абсолютный световой выход.

$$Y = N_{PE} / E_{dep} / PCE$$



- PCE вычисляется в GEANT4, где учтены квантовые эффективности КФЭУ и ФЭУ, а также эффекты преломления, отражения и поглощения света.
- В основном регистрируется прямой свет (~70%), поэтому параметры отражающих поверхностей не столь существенны.
- В таблице приведены результаты по абсолютному световыходу для разных источников излучения (X-rays/альфа-частиц), детекторов излучения (ФЭУ/КФЭУ) и предполагаемых спектров излучения (Auger et al./Heindl et al.) в диапазоне 400-1000 нм.
- Для спектра Heindl et al. значительное расхождение световыходов для ФЭУ и КФЭУ, а для спектра Auger et al. получаются близкие световыходы. Это указание, что спектр Auger et al. лучше описывает реальный спектр излучения.

[37] <https://doi.org/10.1088/1748-0221/6/02/P02011>

[43] <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/03/P03017>

Источник излучения	Спектральное устройство	Абсолютный световой выход, фотон/МэВ, для спектра	
		Heindl et al. [37]	Auger et al. [43]
25 кэВ рентген. излуч.	Сборка ФЭУ	71 ± 14	121 ± 24
	КФЭУ-матрица	212 ± 42	187 ± 37
5.5 МэВ альфа-частицы	Сборка ФЭУ	43 ± 9	107 ± 22
	КФЭУ-матрица	98 ± 20	87 ± 17

- Для ФЭУ наблюдается значительное расхождение световыхода в зависимости от выбранного спектра, т.к. они не чувствительны в ИК диапазоне.
- Использовали данные с КФЭУ-матрицы, т.к. световой выход лучше согласуется для разных спектров излучения и меньше зависимость от эл. поля.
- Итого: 200±50 фот./МэВ (X-rays), 92±23 фот./МэВ (альфа-частицы).

Изучение первичных сцинтилляций в LAr.

Сравнение с другими работами.

Ссылка	Источник излучения	Эл. поле, кВ/см	Спектральный диапазон, нм	Световыход в вид. и ближ. ИК-диап., фотон/МэВ	Комментарии
Heindl et al. [36; 37]	12 кэВ e ⁻	0	300–1000	Наблюдался	Измерен спектр
Buzulutskov et al. [38–40]	25 кэВ рентген. излуч.	0–30	400–1000	510 ± 90	Нет зависис. от поля
Neumeier et al. [46] [41]	12 кэВ e ⁻	0	500–1000	Не наблюда. Наблюд. в ближнем ИК-диап.	
Alexander et al. [42]	511 кэВ γ-излуч.	0	715–900	Наблюдался	τ _f < 100 нс τ _s ≈ 2–4 мкс Нет зависис. от поля
Auger et al. [43]	Высоковольтный пробой	≤ 200	400–800	Наблюдался	Измерен спектр
Эта работа	25 кэВ рентген. излуч.	0–0.62	350–1000	200 ± 50	τ _f < 100 нс τ _s = 1 ± 0.3 мкс
Jones et al. [47]	5.3 МэВ α	0	300–650	Не наблюдался	< 10 фотон/МэВ
Hofmann et al. [44]	10 МэВ протоны	0	300–1000	Наблюдался	Измерен спектр
Escobar et al. [45]	5.4 МэВ α	0	715–900	Наблюдался	
Эта работа	5.5 МэВ α	0.3–0.62	350–1000	92 ± 23	τ _f < 100 нс Нет медл. компон. Нет зависис. от поля

- В таблице представлены все известные на данный момент результаты по первичным сцинтилляциям в чистом LAr в видимом и инфракрасном диапазоне.
- Стоит отметить, что в нашей работе представлен комплексный анализ свойств излучения:
 - проведены измерения для разных источников ионизации (X-rays и альфа-частиц) при регистрации излучения различными спектральными приборами (ФЭУ и КФЭУ)
 - изучена временная структура излучения
 - измерена зависимость световыхода от эл. поля
 - уточнен абсолютный световыход от X-rays
 - впервые определен абсолютный световыход первичных сцинтилляций от альфа-частиц.

[36] <https://doi.org/10.1209/0295-5075/91/62002>
 [37] <https://doi.org/10.1088/1748-0221/6/02/P02011>
 [38] <https://doi.org/10.1209/0295-5075/94/52001>
 [39] <https://doi.org/10.1088/1748-0221/7/06/P06015>
 [40] <https://doi.org/10.1088/1748-0221/7/06/P06014>
 [41] <https://doi.org/10.1209/0295-5075/109/12001>

[42] <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/03/C03010>
 [43] <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/03/P03017>
 [44] <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-013-2618-0>
 [45] <https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/03/C03031>
 [46] <https://doi.org/10.1209/0295-5075/106/32001>
 [47] <https://doi.org/10.1088/1748-0221/8/12/P12015>

Изучение первичных сцинтилляций в LAr. Обсуждение.

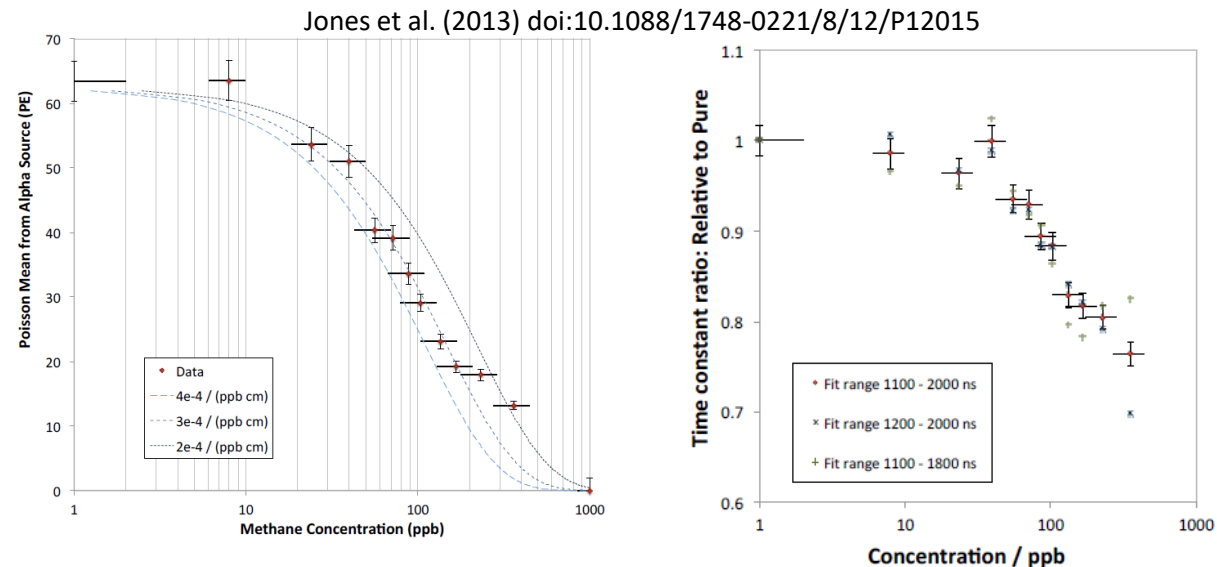
- Итоговый абсолютный световыход в чистом жидком аргоне составил 200 ± 50 фотон/МэВ и 92 ± 23 фотон/МэВ для импульсного рентгеновского излучения и альфа-частиц соответственно.
- Полученные значения абсолютного световыхода являются довольно низкими для практического применения в двухфазных детекторах темной материи, где предполагается наблюдение WIMP по регистрации ядер отдачи с энергией менее 10 кэВ_{nr} . Тем не менее первичные сцинтилляции в видимом диапазоне могут найти применение в экспериментах, где регистрируются большие энерговыделения (десятки-сотни МэВ).
- Механизм возникновения первичных сцинтилляций в видимом диапазоне пока остается неясным, но есть указания на механизм ТИН:
 - наблюдается быстрая компонента сигнала с характерным временем менее 100 нс
 - интенсивность не зависит от эл. поля

Часть 4

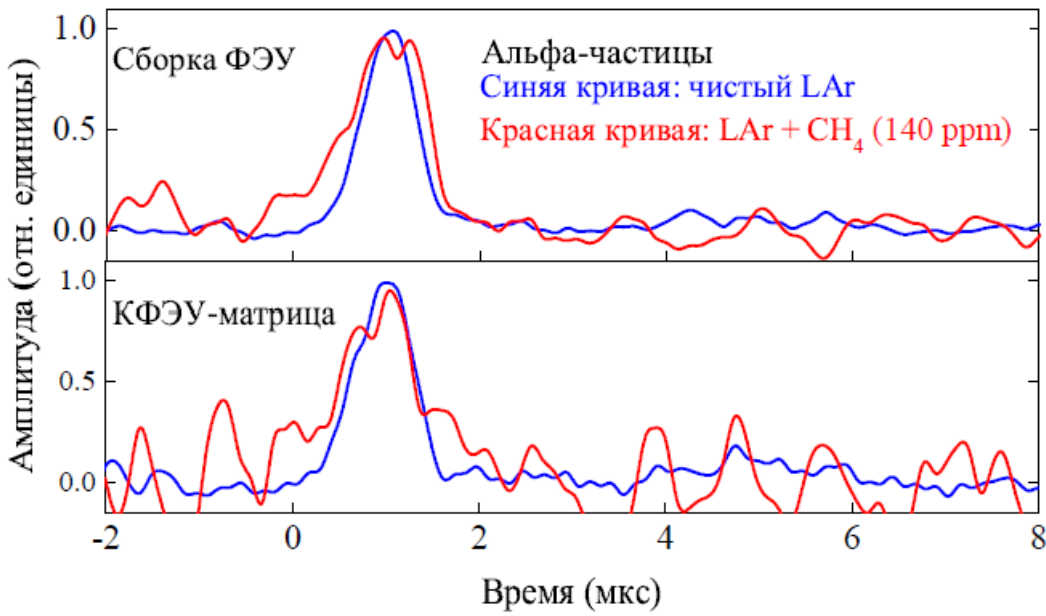
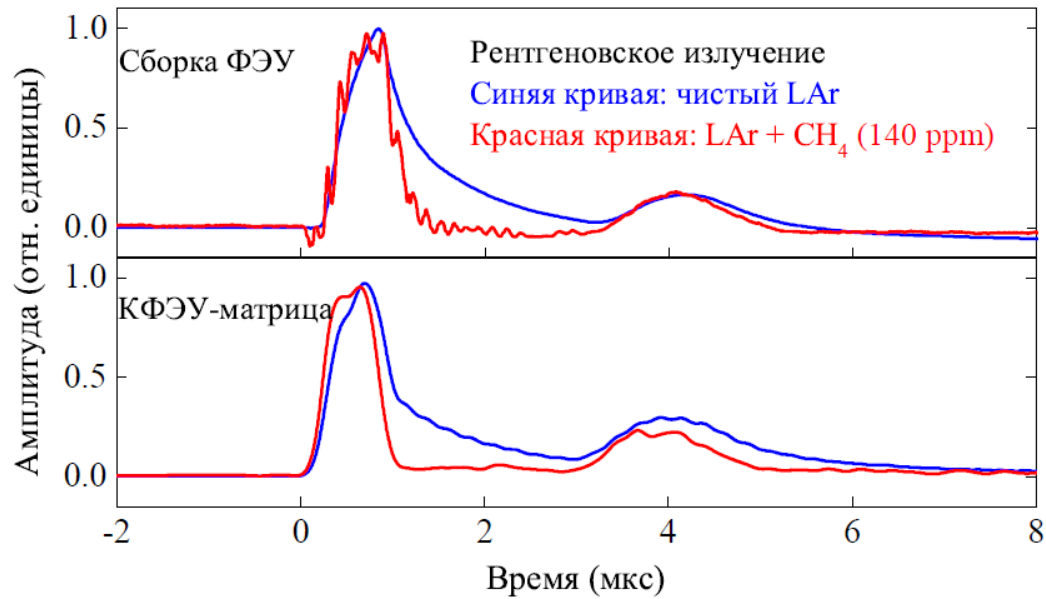
Изучение первичных сцинтилляций в видимом диапазоне в жидком аргоне с примесью метана

Изучение первичных сцинтилляций в $\text{LAr}+\text{CH}_4$.

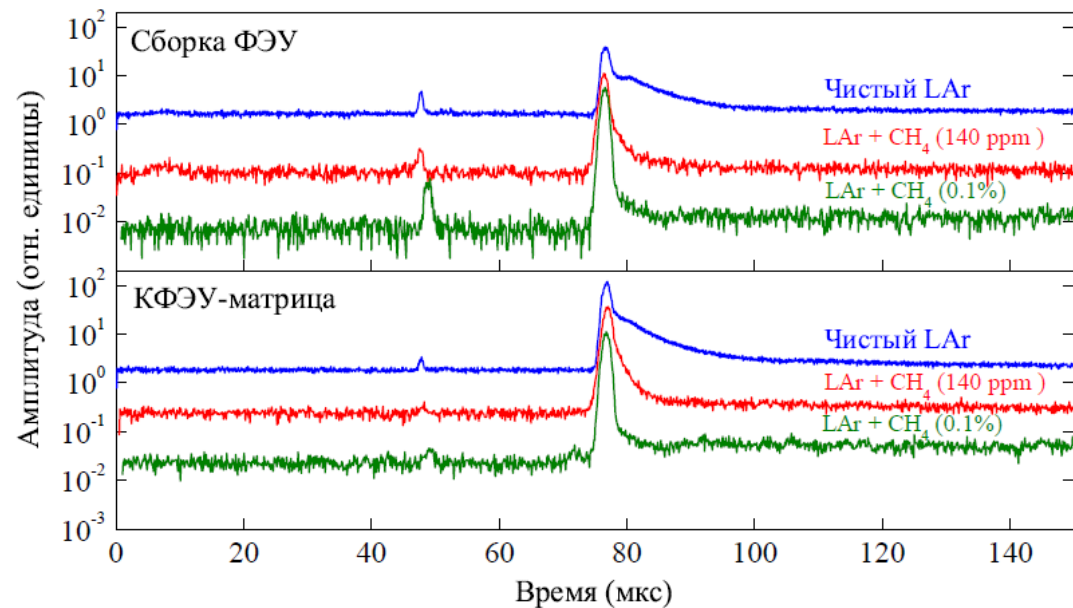
- До недавнего времени veto-детекторы нейтронов были основаны на смеси жидких органических сцинтилляторов.
- По причинам безопасности в будущих масштабных экспериментах по поиску темной материи, как, например, DarkSide-20k, планируют отказаться от органических сцинтилляторов.
- Одно из возможных решений - аргон-метановая смесь.
- При попадании в veto-детектор нейтрон термализуется, а затем захватывается преимущественно ядром аргона или водорода, испуская множество гамма-квантов с суммарной энергией около 6 МэВ или 2 МэВ соответственно.
- ВУФ фотоны поглощаются даже при небольшом содержании метана (>0.1 ppm) как из-за поглощения света молекулами метана так и из-за процессов снятия возбуждения эксимеров безызлучательным способом при столкновении с молекулами метана (процесс тушения).
- Есть гипотеза, что первичные сцинтилляции в чистом аргоне вызваны ТИН (широкий спектр, излучение не связано с возбужденными состояниями) и их интенсивность не будет снижаться в аргон-метановой смеси.



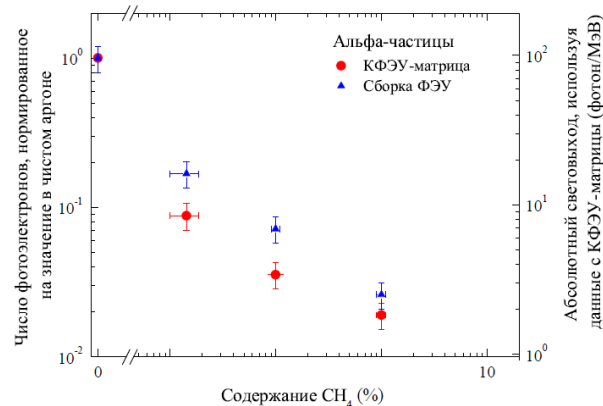
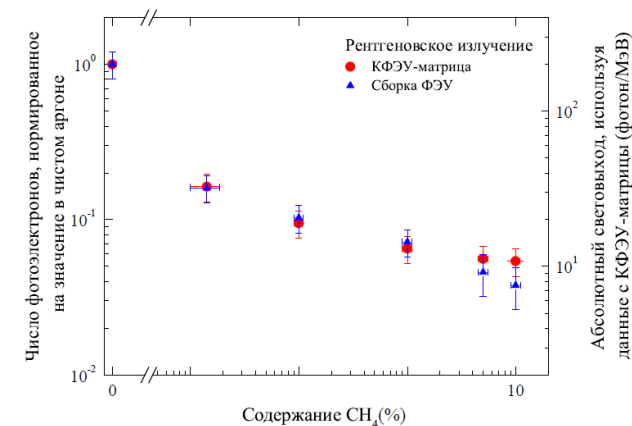
Изучение первичных сцинтилляций в LAr+CH₄. Анализ формы сигнала.



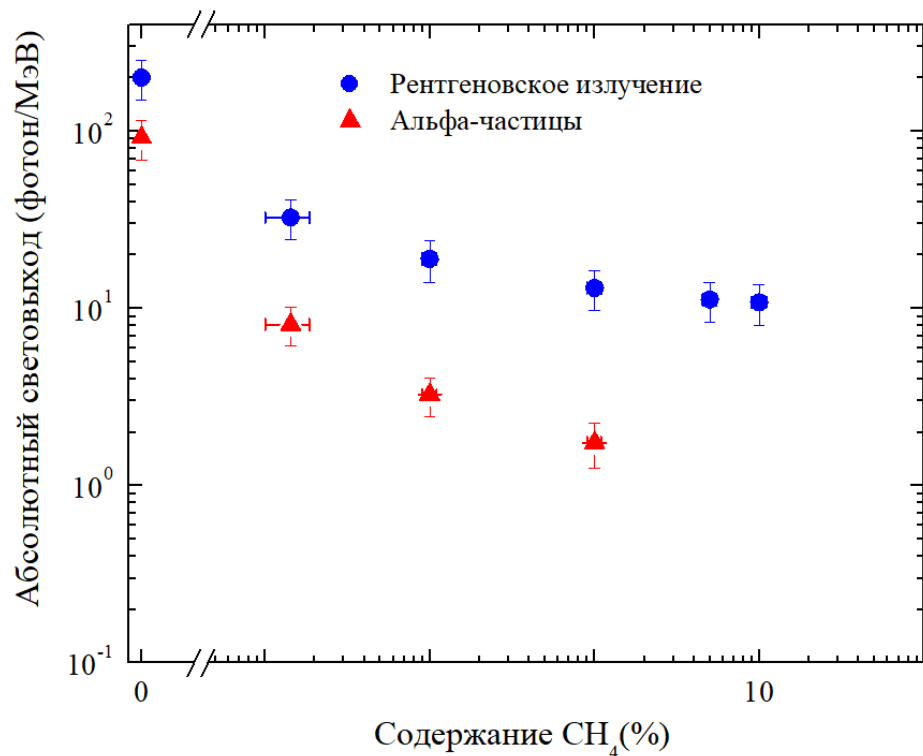
- В измерениях с X-rays при увеличении концентрации CH₄ остается лишь быстрая компонента сигнала (<100 нс).
- В измерениях с альфа частицами при увеличении концентрации CH₄ принципиальных изменений в форме сигнала не происходит.



Изучение первичных сцинтилляций в LAr+CH₄. Абсолютный световыход.



- Используя значение абсолютного световыхода в чистом LAr по КФЭУ-матрице и зависимость относительного фотоэлектронного выхода от концентрации CH₄, был найден абсолютный световыход в LAr+CH₄.
- Предполагалось, что спектр излучения не меняется при добавлении CH₄ в LAr: найти в литературе спектр излучения LCH₄, а тем более LAr+CH₄, не удалось.



Жидкая смесь	Абсолютный световыход, фотон/МэВ	
	Импульсное рентген. излуч., $\mathcal{E}_d = 0$ кВ/см	Альфа-частицы, $\mathcal{E}_d = 0.62$ кВ/см
LAr (100 %)	200±50	92±23
LAr + CH ₄ (140 ppm)	32±8	8.2±2.0
LAr + CH ₄ (0.1 %)	19±5	3.3±0.8
LAr + CH ₄ (1 %)	13.0±3.3	1.8±0.5
LAr + CH ₄ (5 %)	11.3±2.8	-
LAr + CH ₄ (10 %)	11.1±2.8	-

Изучение первичных сцинтилляций в $L\text{Ar}+\text{CH}_4$. Обсуждение.

- Итого, при содержании метана в 1% (минимум, необходимый для компактного вето-детектора нейтронов) абсолютный световыход в видимом диапазоне для рентгеновского излучения и альфа-частиц составил 13 фотон/МэВ и 1.8 фотон/МэВ соответственно.
- Используя эти данные можно оценить, что в вето-детекторе нейтронов при регистрации гамма-излучения, сопровождающего захват нейтронов ядрами аргона или водорода, световыход составит 78 фотонов и 26 фотонов соответственно.
- Полученный световыход довольно низкий, поэтому жидкий аргон с примесью метана вряд ли может быть использован в качестве рабочей среды для вето-детекторов нейтронов.
- Подтвердилась гипотеза о наличии первичных сцинтилляций в аргон-метановой смеси, но световыход значительно ниже, чем в чистом жидком аргоне.

Выводы и заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработан и создан двухфазный детектор на основе аргона с двумя вариантами альтернативной схемы считывания электролюминесцентного сигнала в видимом диапазоне: с прямым считыванием на КФЭУ-матрицу и считыванием на умножитель ТГЭУ/КФЭУ-матрица.
2. Продемонстрировано успешное считывание на КФЭУ-матрицу при температуре жидкого аргона, разработан алгоритм реконструкции координат в двухфазном детекторе.
3. Для двухфазного детектора измерен световыход электролюминесценции в видимом диапазоне и оценен энергетический порог регистрации частиц для двух вариантов альтернативной схемы оптического считывания. При прямом считывании на КФЭУ-матрицу порог регистрации составляет около 6 кэВ_{nr} , что достаточно для поиска WIMP с массой выше $10 \text{ ГэВ}/c^2$. При считывании на умножитель ТГЭУ/КФЭУ-матрица порог регистрации составляет около 2 кэВ_{nr} , что позволяет создать детектор для поиска WIMP с массой до нескольких $\text{ГэВ}/c^2$.
4. Систематически изучены первичные сцинтилляции в видимом диапазоне в жидком аргоне. Абсолютный световыход первичных сцинтилляций в видимом диапазоне составляет 200 фотон/МэВ для рентгеновского излучения и 92 фотон/МэВ для альфа-частиц. Полученные результаты указывают, что механизм первичных сцинтилляций в видимом диапазоне в жидком аргоне отличается от эксимерного.
5. Впервые изучены первичные сцинтилляции в видимом диапазоне в смесях жидкого аргона с метаном. При добавлении метана в жидкий аргон значительно снижается световыход первичных сцинтилляций в видимом диапазоне, однако при высоком содержании метана (свыше 1 %) заметна тенденция выхода на плато. При содержании метана в 1 % абсолютный световыход первичных сцинтилляций в видимом диапазоне составляет 13 фотон/МэВ для рентгеновского излучения и 1.8 фотон/МэВ для альфа-частиц. Аргон-метановая смесь имеет низкий световыход и вряд ли может быть использована в вето-детекторе нейтронов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Двухфазный детектор на основе аргона с новой (альтернативной) схемой считывания электролюминесцентного сигнала в видимом и инфракрасном диапазоне позволяет достичь порогов регистрации 6 кэВ_{nr} и 2 кэВ_{nr} при прямом считывании на КФЭУ-матрицу и считывании на умножитель ТГЭУ/КФЭУ-матрица, соответственно, что достаточно для поиска WIMP с массой выше нескольких $\text{ГэВ}/c^2$.
2. Абсолютный световыход первичных сцинтилляций в видимом диапазоне в жидком аргоне составляет 200 фотон/МэВ для рентгеновского излучения и 92 фотон/МэВ для альфа-частиц. Систематическое изучение первичных сцинтилляций в видимом диапазоне указывает на механизм возникновения излучения, отличный от эксимерного.
3. При добавлении метана в жидкий аргон значительно снижается световыход первичных сцинтилляций в видимом диапазоне, однако при высоком содержании метана (свыше 1 %) заметна тенденция выхода на плато. При содержании метана в 1 % абсолютный световыход первичных сцинтилляций в видимом диапазоне составляет 13 фотон/МэВ для рентгеновского излучения и 1.8 фотон/МэВ для альфа-частиц.

Научная новизна

1. Впервые продемонстрирована успешная работа практического двухфазного детектора в аргоне с прямым считыванием на КФЭУ-матрицу в видимом диапазоне. Кроме того, это является первым практическим применением эффекта тормозного излучения на нейтральных атомах в детекторах частиц.
2. Впервые систематически изучены первичные сцинтилляции и измерен абсолютный световыход в видимом диапазоне в жидком аргоне и его смесях с метаном для альфа-частиц и рентгеновского излучения.

Публикации по теме работы

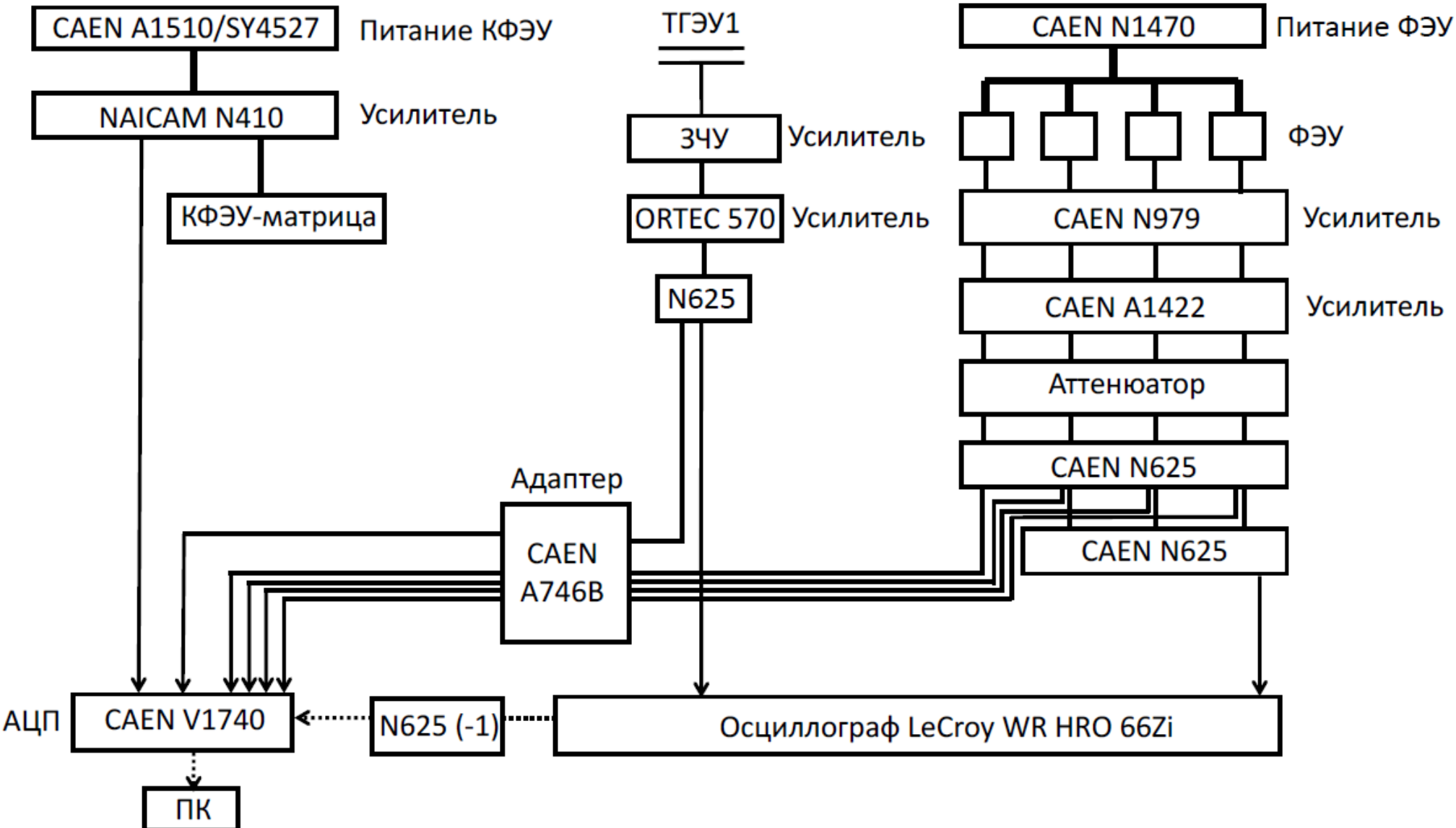
1. Bondar A.,... Oleynikov V. et al. Characterization of a ^{109}Cd gamma-ray source for the two-phase argon detector // Instruments and Experimental Techniques. 2019. Vol. 62. 746-749. DOI: 10.1134/S0020441219050142
2. Bondar A.,... Oleynikov V. et al. Effect of neutral bremsstrahlung on the operation of two-phase argon detectors // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2020. Vol. 47. 162-165. DOI: 10.3103/S1068335620060032
3. Bondar A.,... Oleynikov V. et al. Observation of primary scintillations in the visible range in liquid argon doped with methane // J. of Instrumentation. 2020. Vol. 15. C06053. DOI: 10.1088/1748-0221/15/06/C06053
4. Aalseth C.E.,... Oleynikov V. et al. SiPM-matrix readout of two-phase argon detectors using electroluminescence in the visible and near infrared range // Eur. Phys. J. C. 2021. Vol. 81:2. 153. DOI: 10.1140/epjc/s10052-020-08801-2
5. Bondar A.,... Oleynikov V. et al. Study of visible-light emission in pure and methane-doped liquid argon // J. of Instrumentation. 2022. Vol. 17. P09009. DOI: 10.1088/1748-0221/17/09/P09009

Основные результаты также были доложены на международных конференциях

1. DarkSide collaboration meeting, Пула, Италия, 2018. Устный доклад.
2. Darkside collaboration meeting, Неаполь, Италия, 2019. Устный доклад.
3. Moscow International School of Physics, Москва, Россия, 2019. Устный доклад.
4. Instrumentation for Colliding Beam Physics (INSTR20) Conference, Новосибирск, Россия, 2020. Постерный доклад.
5. Asian Forum for Accelerators and Detectors, Синьчжу, Тайвань, 2024. Устный доклад.

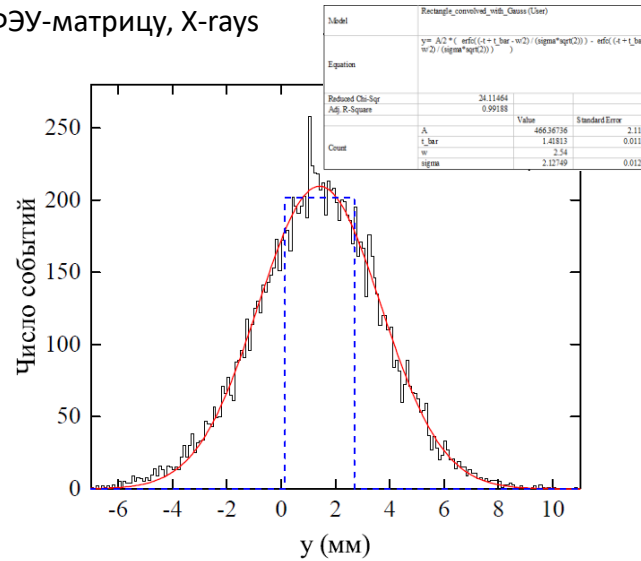
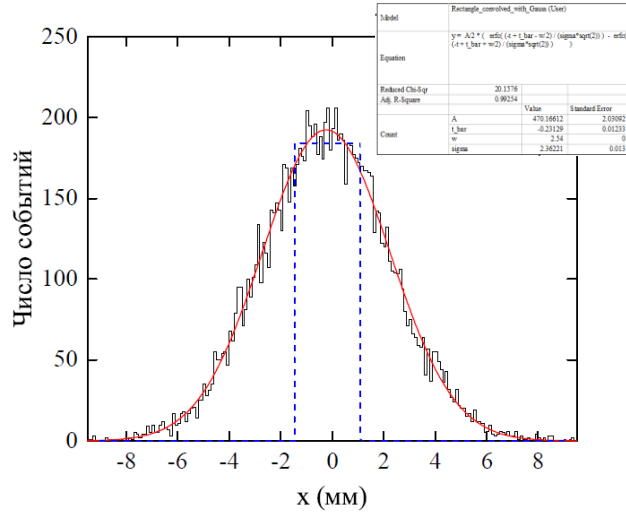
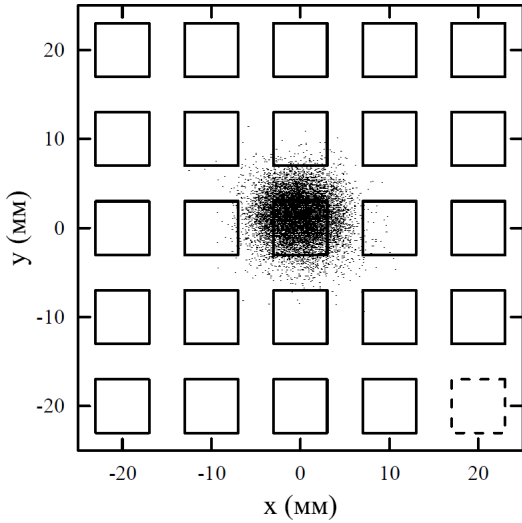
Спасибо за внимание!

Экспериментальная установка. Система питания и сбора данных.

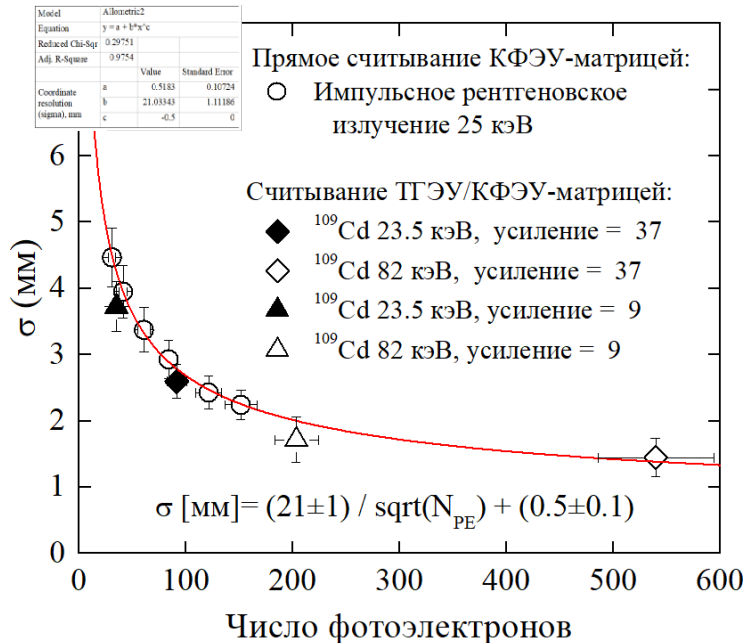
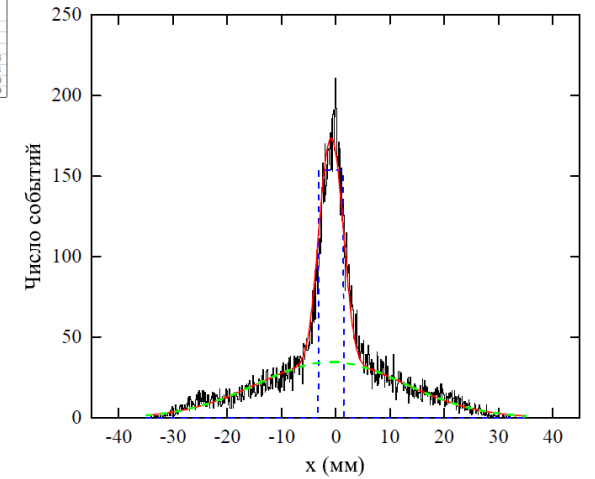


ЭЛ видимом и ИК диапазоне. Реконструкция координат.

Распределение координат при прямом считывании на КФЭУ-матрицу, X-rays



Распределение координат при считывании на ТГЭУ/КФЭУ-матрицу, ¹⁰⁹Cd, 59–88 кэВ

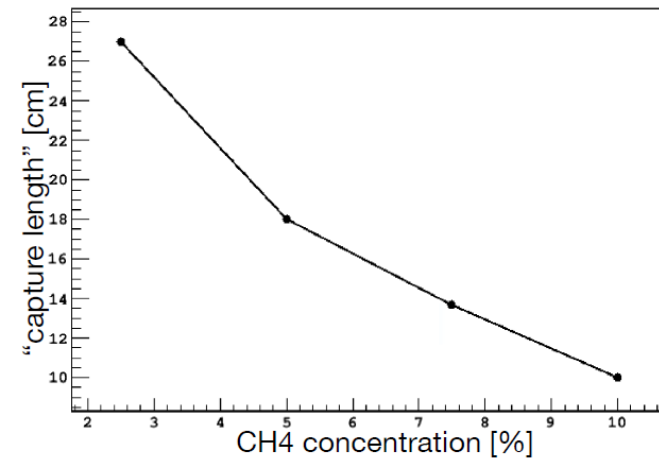
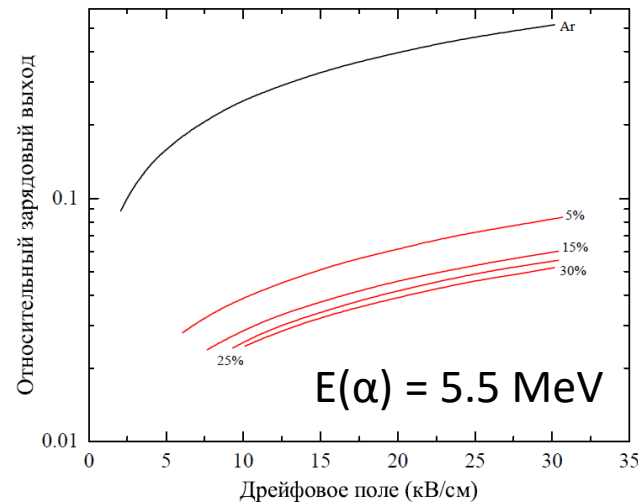
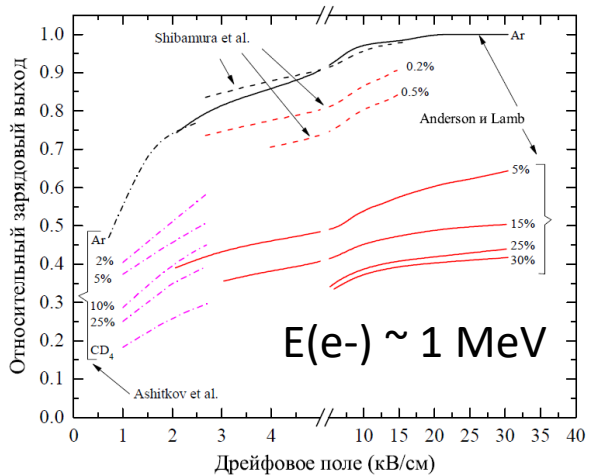
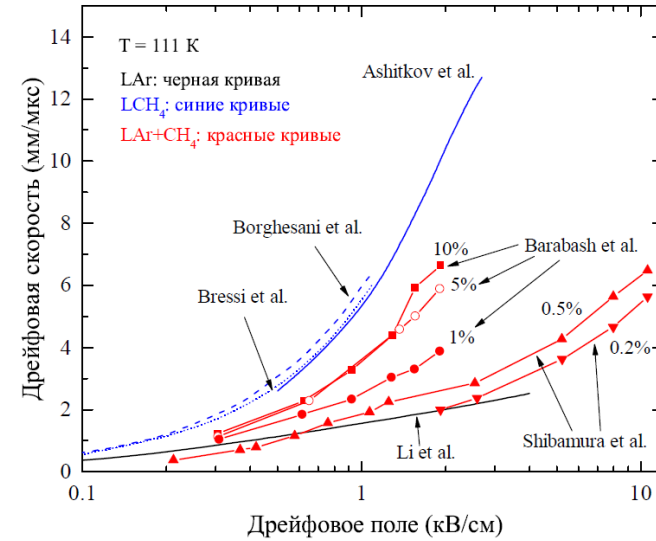
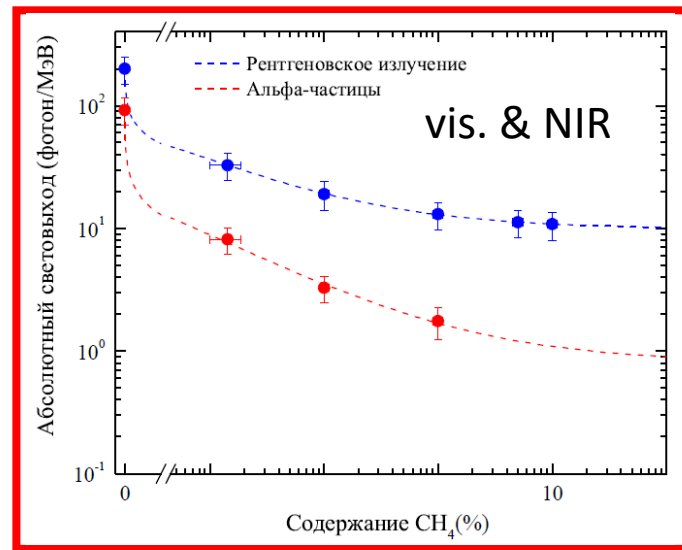
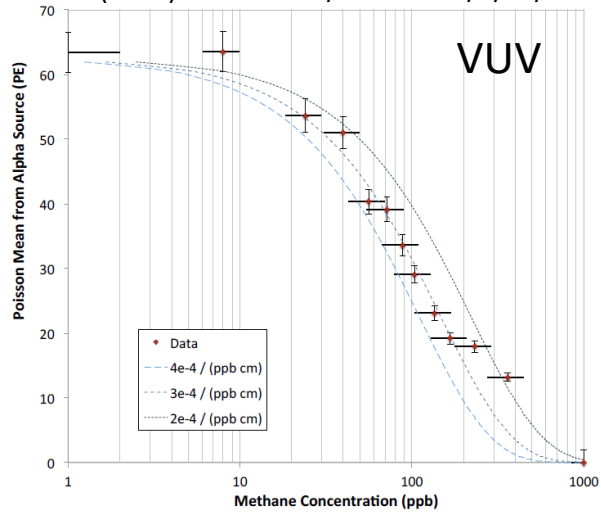


Эффекты от добавки CH₄ в LAr

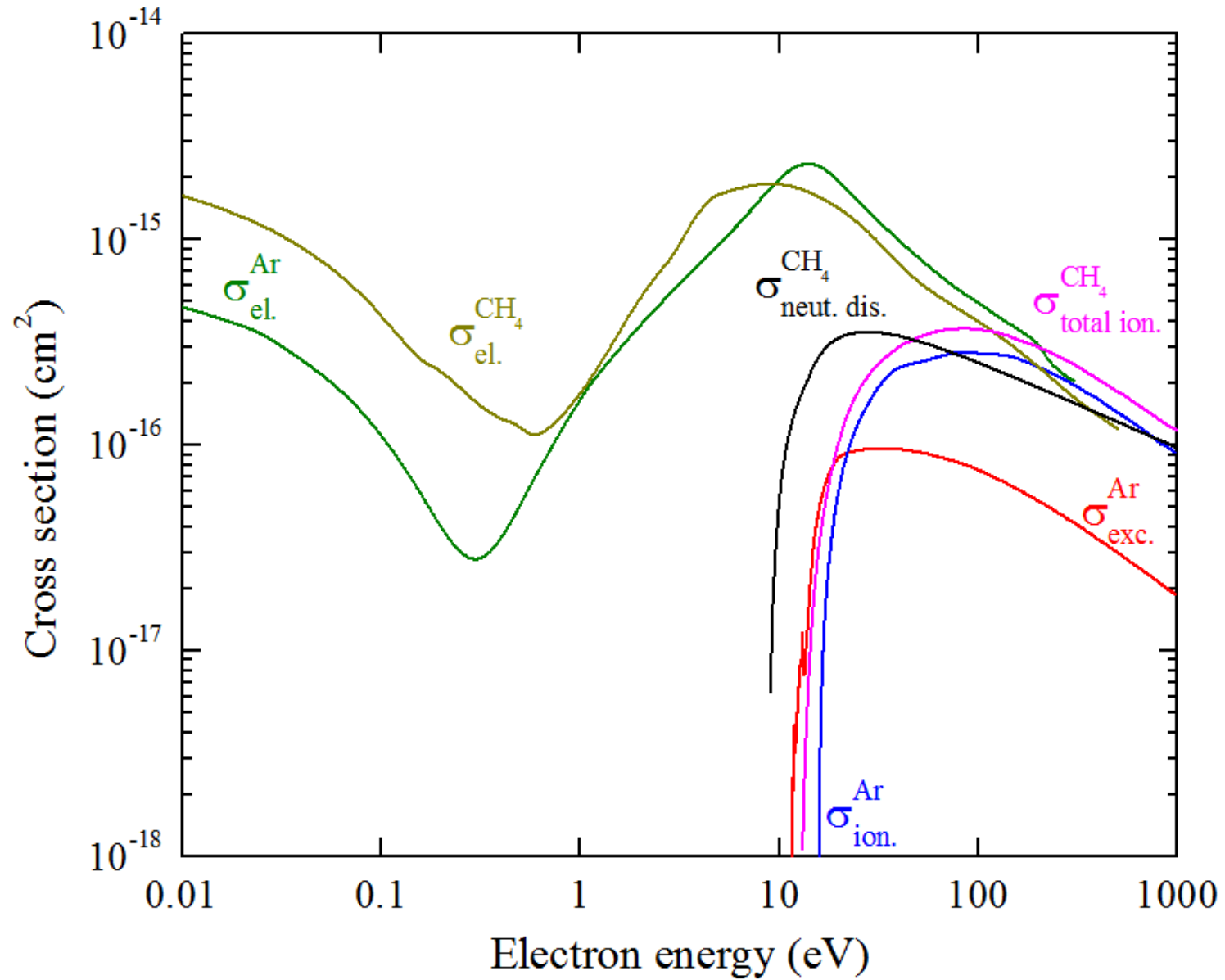
" - "

" + "

Jones et al. (2015) doi:10.1088/1748-0221/8/12/P12015



Сечения



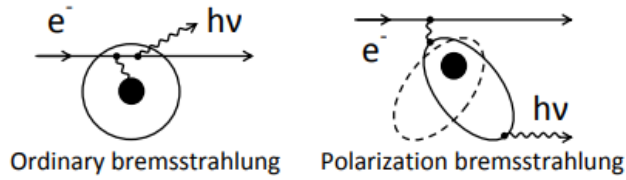


Figure 1: Schematic representation of the ordinary and polarization bremsstrahlung processes.

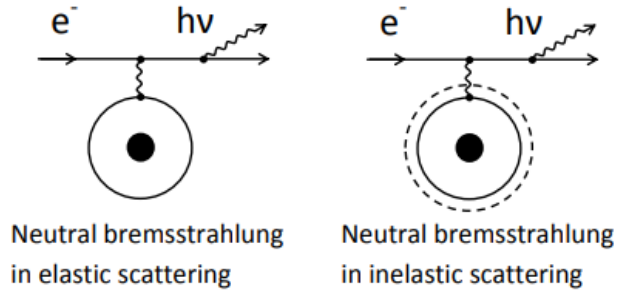
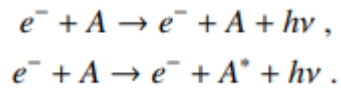


Figure 2: Schematic representation of the neutral bremsstrahlung process in elastic and inelastic electron scattering.



$$\left(\frac{d\sigma}{dv}\right)_{NBrS,el} = \frac{8 r_e}{3 c} \frac{1}{hv} \left(\frac{E - hv}{E}\right)^{1/2} \times$$

$$\times [(E - hv) \sigma_{el}(E) + E \sigma_{el}(E - hv)] ,$$

$$\frac{d(Y_{EL}/N)_{NBrS}}{d\lambda} = \int_{hv}^{\infty} \frac{v_e}{v_d} \frac{d\sigma}{dv} \frac{dv}{d\lambda} f(E) dE$$

in (photon cm²)/(electron atom nm) .

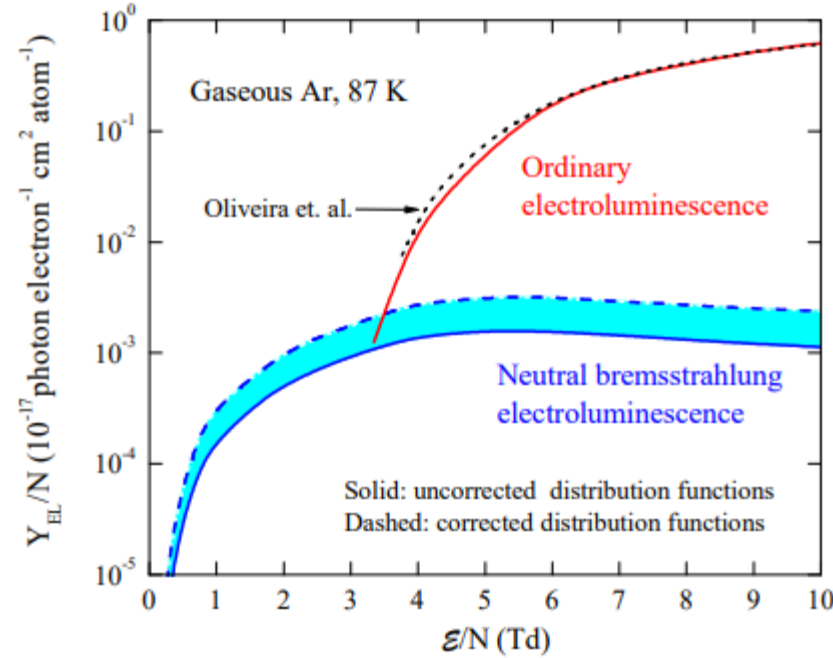


Figure 13: Reduced ordinary EL yield and that of neutral bremsstrahlung at 0-1000 nm in gaseous Ar as a function of the reduced electric field. The quantity was calculated for two types of distribution functions: those obtained using Boltzmann equation solver (uncorrected distribution functions) and those corrected for mean energy before collisions (corrected distribution functions). For comparison, the EL yield calculated using microscopic approach from Oliveira et al. [15] is shown.

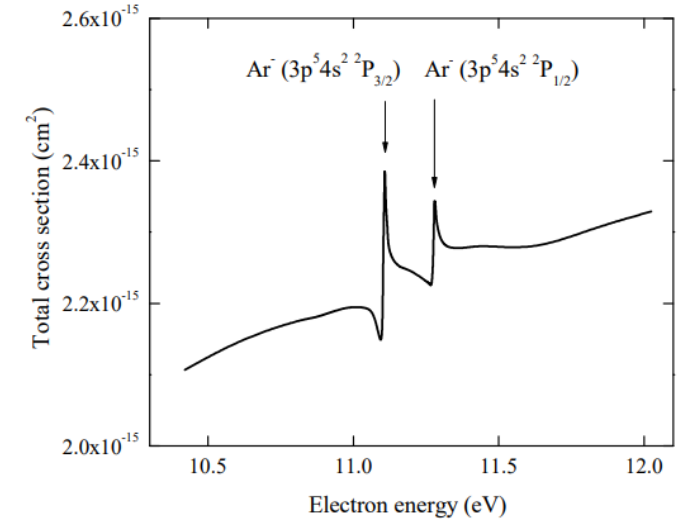
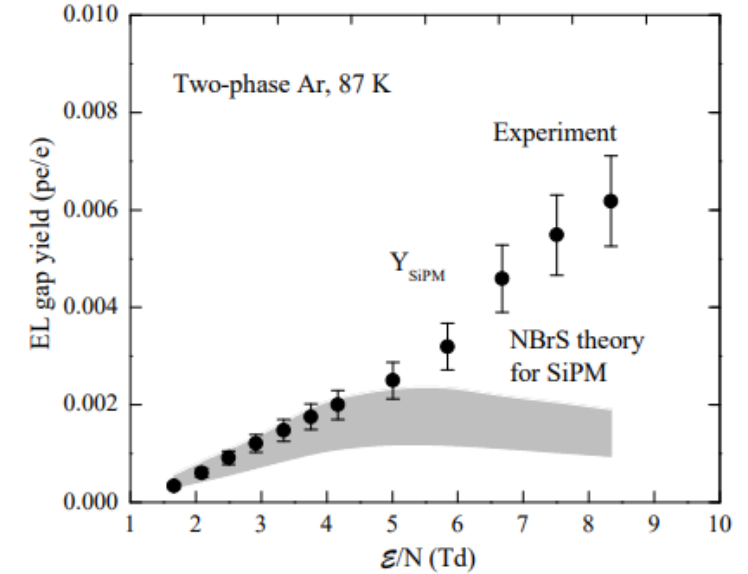


Figure 4: Experimental cross section for electron scattering from Ar around Feshbach resonances [43]



NBrS and excimer electroluminescence in noble gases and liquids (BINP results)

NBrS and excimer electroluminescence in noble gases

<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-021-09913-z>

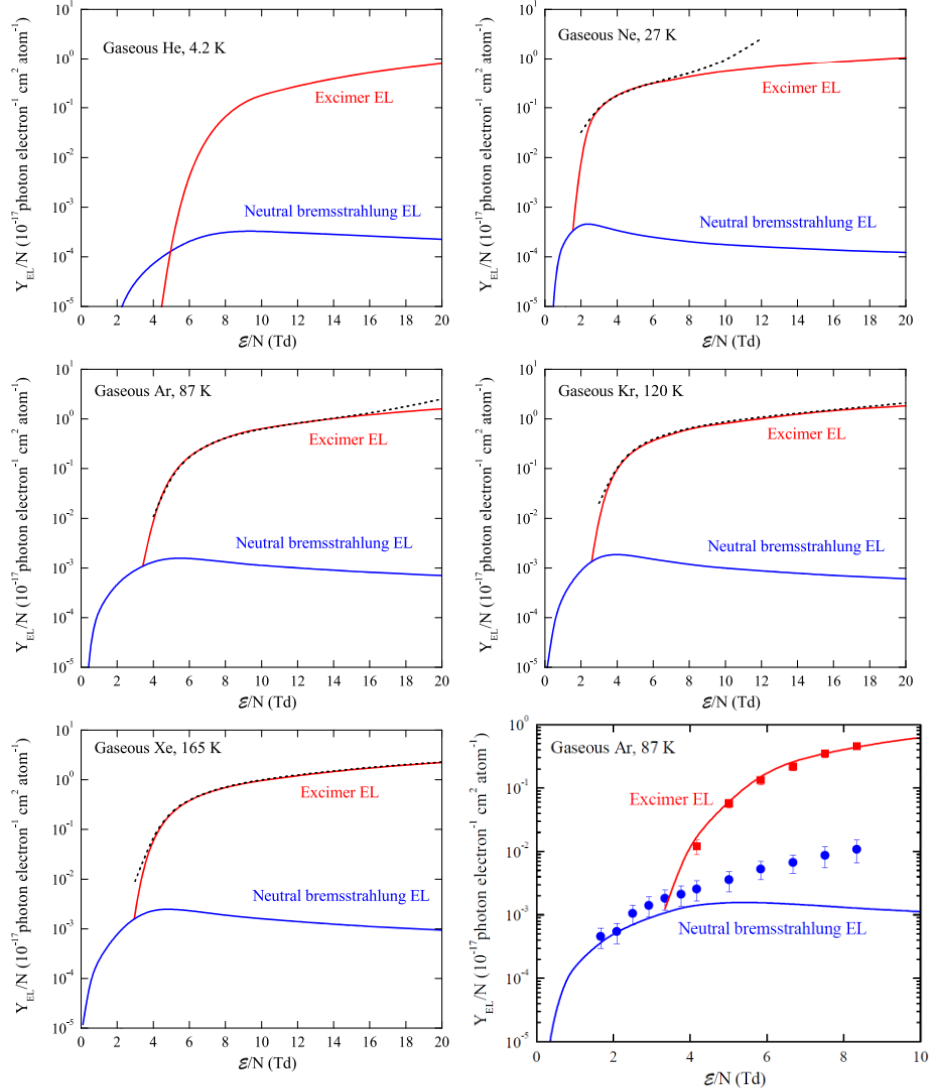
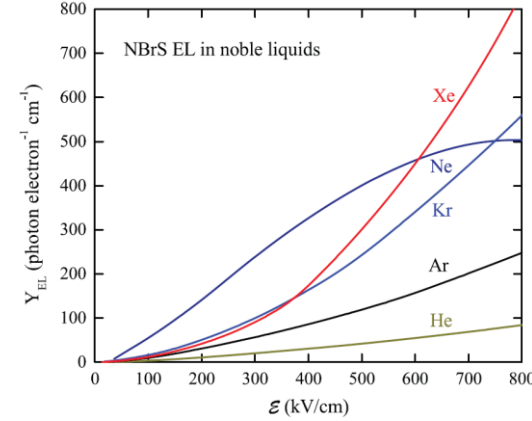


Fig. 12 Reduced EL yield for NBrS EL at 0–1000 nm and that of excimer EL in noble gases as a function of the reduced electric field, calculated in this work using Boltzmann equation solver (solid lines).

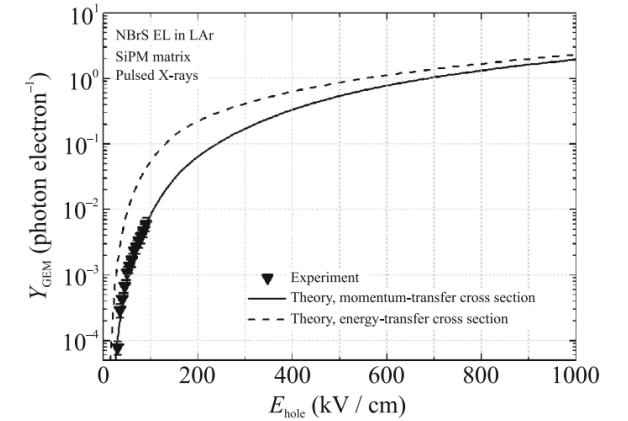
For comparison, the EL yield of excimer EL, calculated using microscopic approach [9], is shown (dashed lines)

NBrS and excimer electroluminescence in noble liquids

<https://doi.org/10.1209/0295-5075/ac4c03>

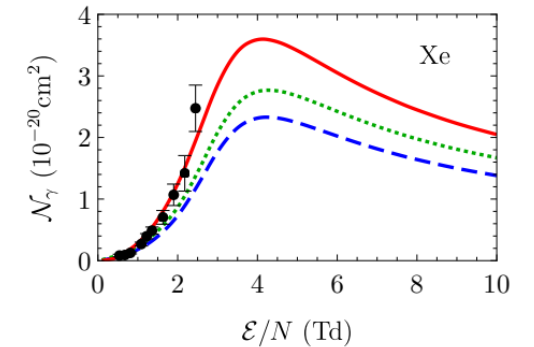
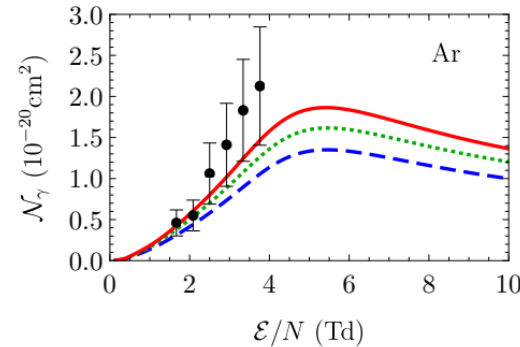


<https://doi.org/10.1134/S0021364023601847>



The theoretical department of the Budker Institute of Nuclear Physics carried out a detailed analysis of the NBrS EL spectra, using the exact formulas.

<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2022.09.012>



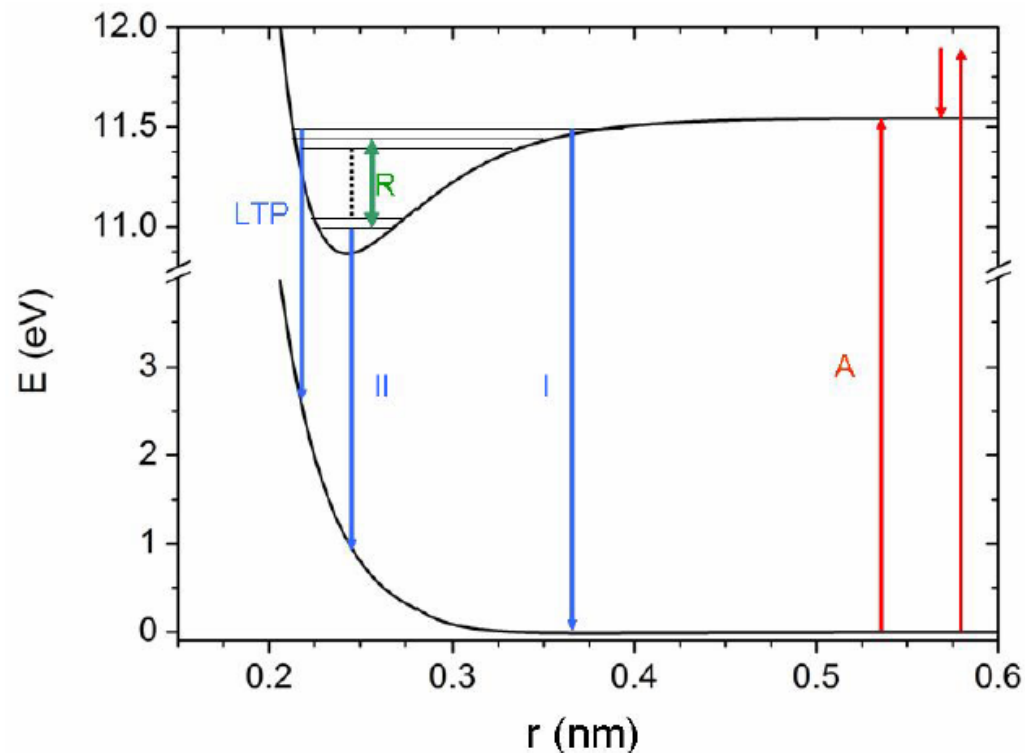


Fig. 2: (Colour on-line) Schematic level diagram of the lowest-lying atomic and molecular states of argon. Transitions from vibrationally relaxed molecules to the repulsive ground state are marked II. These transitions lead to the so-called second excimer continuum of the rare gases. Transitions marked I are related to the so-called first continuum and the “classical left turning point, LTP” (left side). Direct excitation (A), ionization, and recombination is schematically shown on the right side of the diagram. A way to enhance the intensity of the first continuum by a collisional redistribution of the population of vibrational levels (R) is described in this paper.

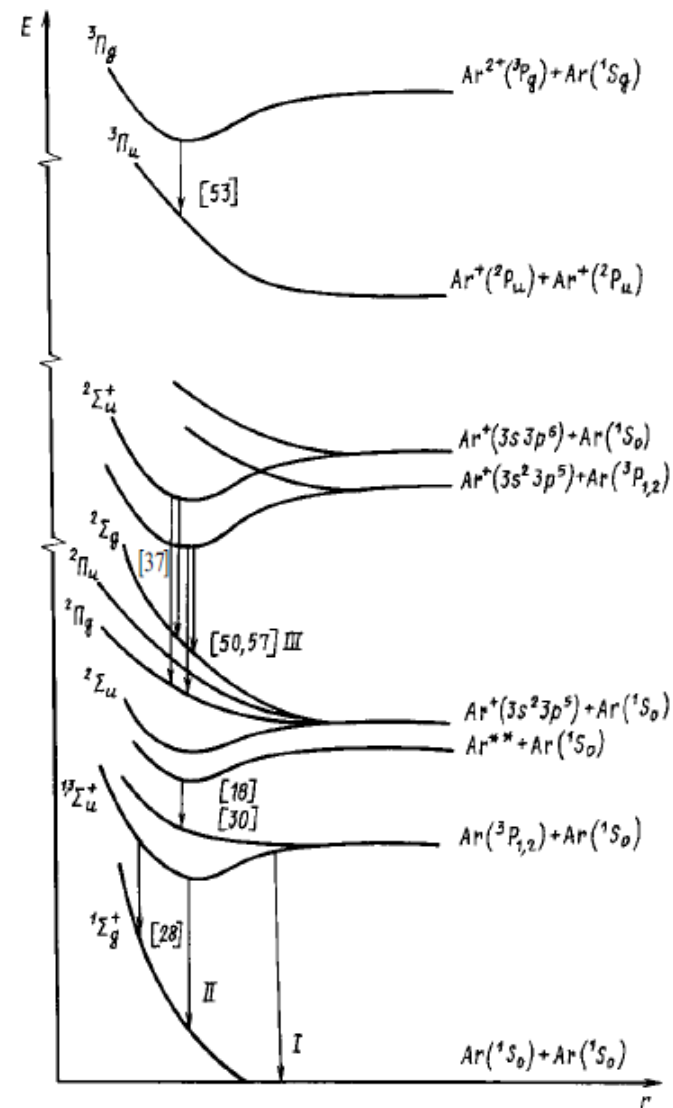
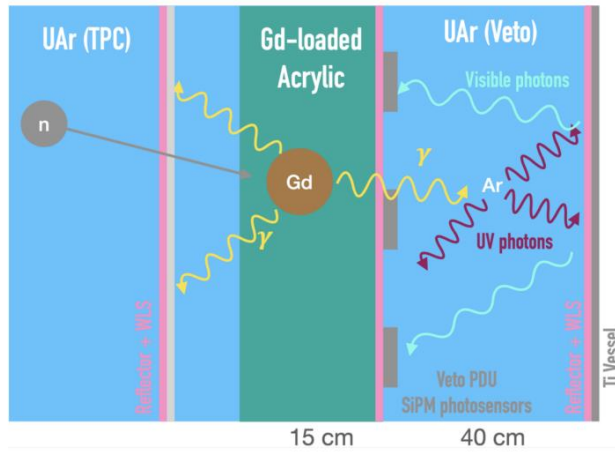


Рис.1. Потенциальные кривые молекул и ионов молекул инертных газов. Стрелками показаны димерные переходы (I, II – соответственно переходы в первый и второй континуумы) и переходы в третий континуум согласно нашей (III) и другим (прочие переходы) точкам зрения.

Neutron veto on DarkSide-20k inner detector

<https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.03597>



DarkSide-20k: Gd-loaded acrylic
(neutron moderator) and pure LAr + WLS

Экимерный механизм

