



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук

Исследование электролюминесценции в видимом диапазоне в детекторах на основе жидкого аргона

Олейников Владислав Петрович

Научная сессия Объединенного ученого совета по физическим наукам СО РАН

Научный руководитель:

д.ф.-м.н. Бузулуцков А.Ф.,

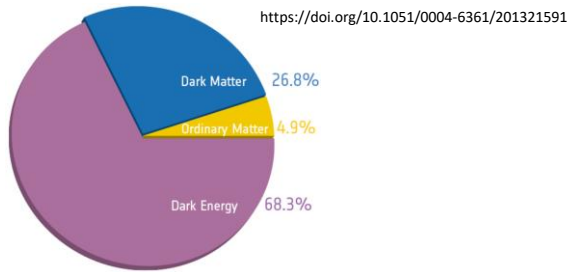
д.ф.-м.н., академик РАН Бондарь А.Е.

Новосибирск - 2025

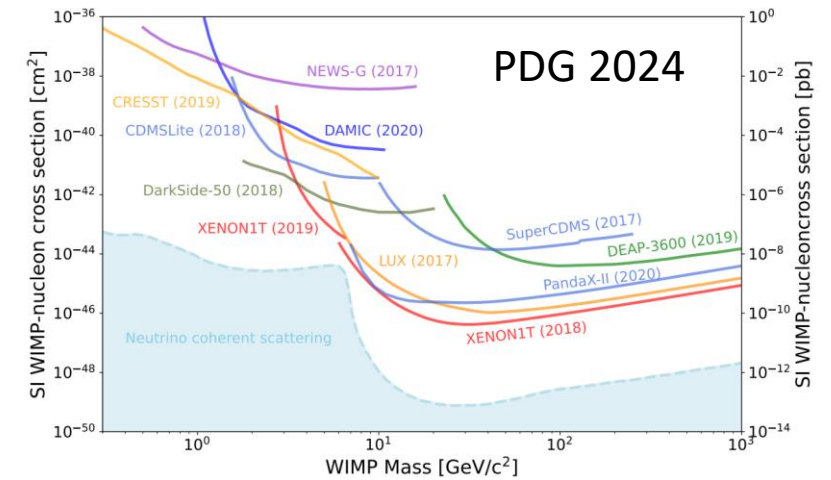
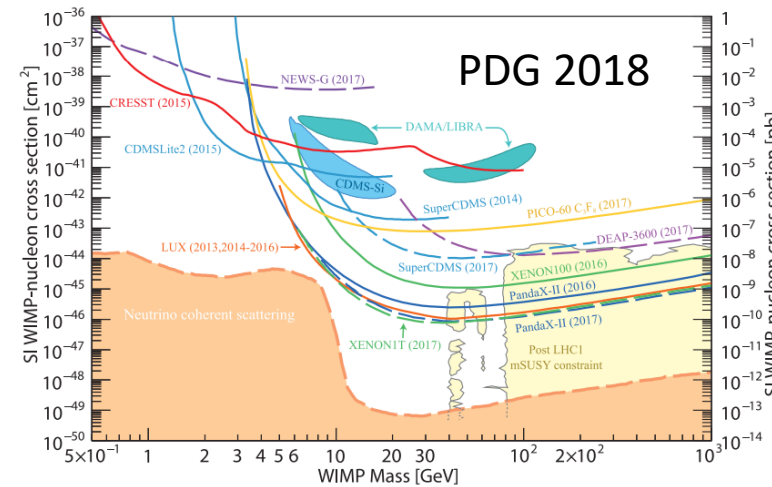
Структура доклада

- Детекторы темной материи
- Двухфазный аргоновый детектор
- Проблемы масштабирования двухфазного детектора
- Механизмы излучения в аргоне
- Экспериментальная установка
- Электролюминесценция в жидкости в видимом диапазоне
- Результаты поиска темной материи в эксперименте DarkSide-50
- Выводы

Детекторы темной материи



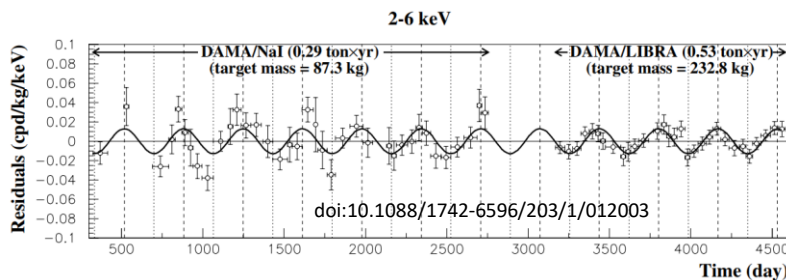
WIMP -
слабовзаимодействующая
массивная частица.



Рассеяние. $N + \text{WIMP} \rightarrow N' + \text{WIMP}'$ Одним из возможных путей дальнейшего прогресса в прямом поиске темной материи является увеличение массы рабочего вещества детектора (масштабирование).

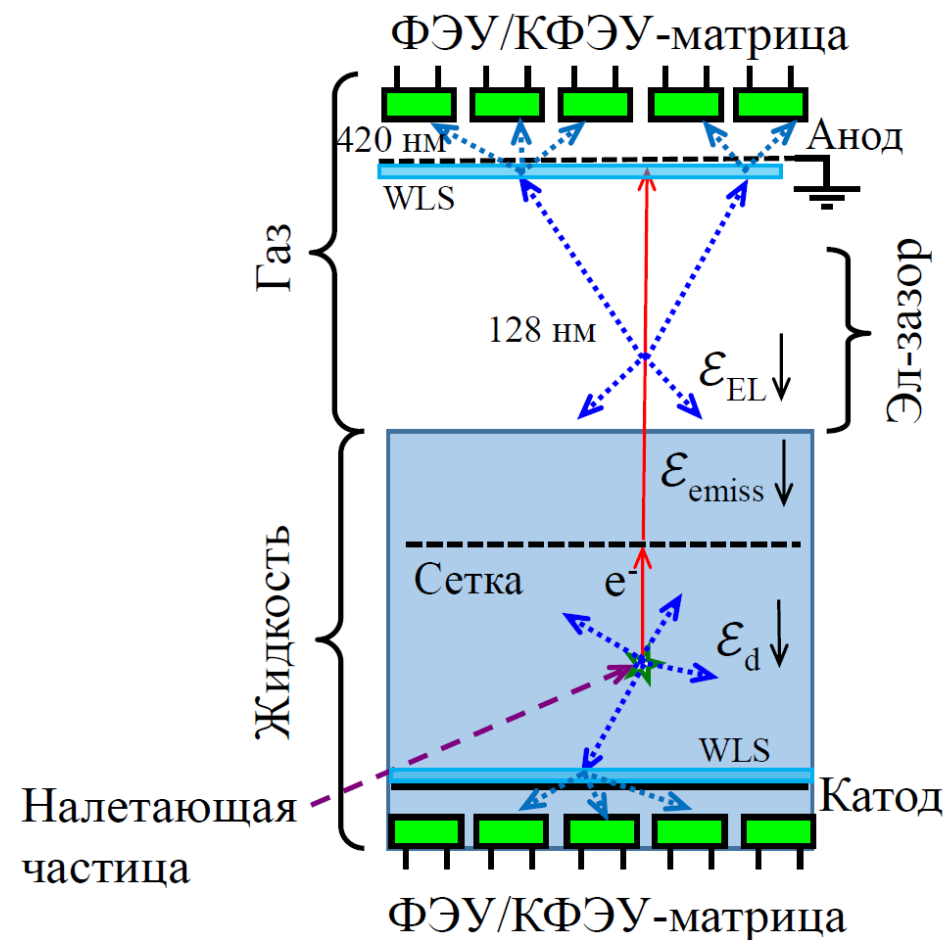
Xe

Ar



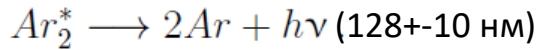
Двухфазный аргонный детектор

- В месте взаимодействия налетающей частицы с жидким аргонном возникает излучение, называемое сигналом S1 или сигналом первичных сцинтилляций.
- Также в месте взаимодействия возникают электрон-ионные пары. При приложении электрического поля к объему детектора часть электронов выходит в газовую фазу. При взаимодействии электронов с атомами газа при достаточно высоком электрическом поле возникает излучение, называемое сигналом S2 или электролюминесцентным (ЭЛ) сигналом.
- Доминирующим механизмом излучения как S1, так и S2 сигнала является эксимерный механизм, где в результате распада эксимеров аргона происходит излучение в вакуумном ультрафиолете (ВУФ) со средней длиной волны 128 нм.
- Зарегистрировать ВУФ напрямую сложно, поэтому используют смеситель спектра (чаще всего ТФБ), переизлучающий ВУФ в видимый диапазон.



Механизмы излучения света в аргоне

- Экимерный механизм. В GAr и LAr.

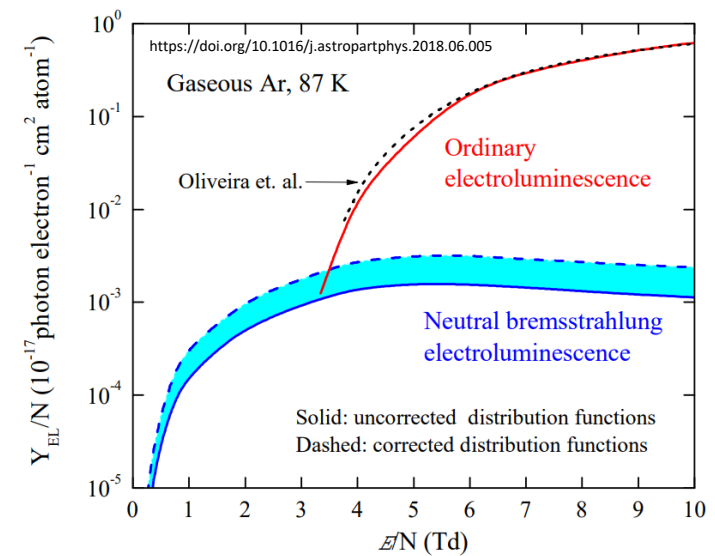
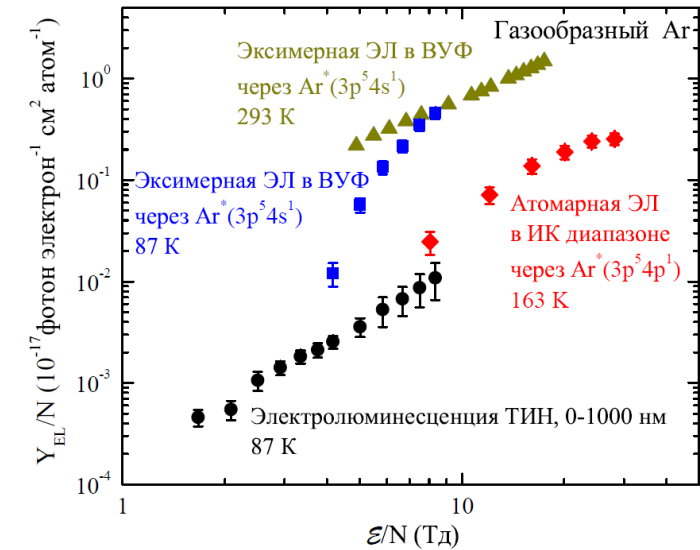
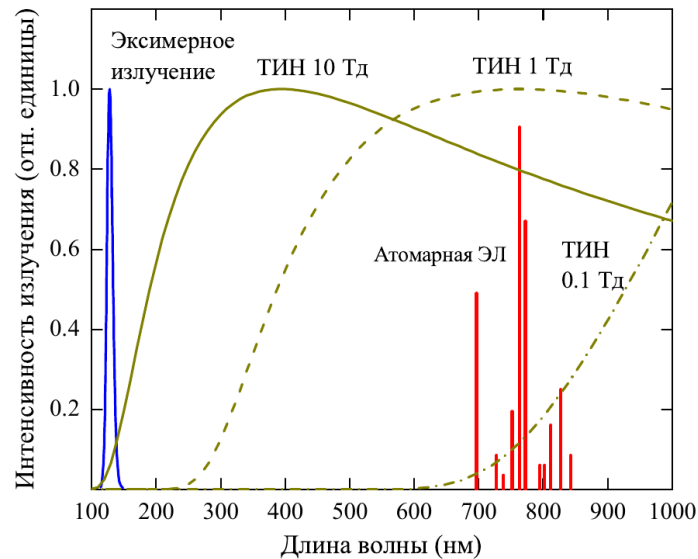
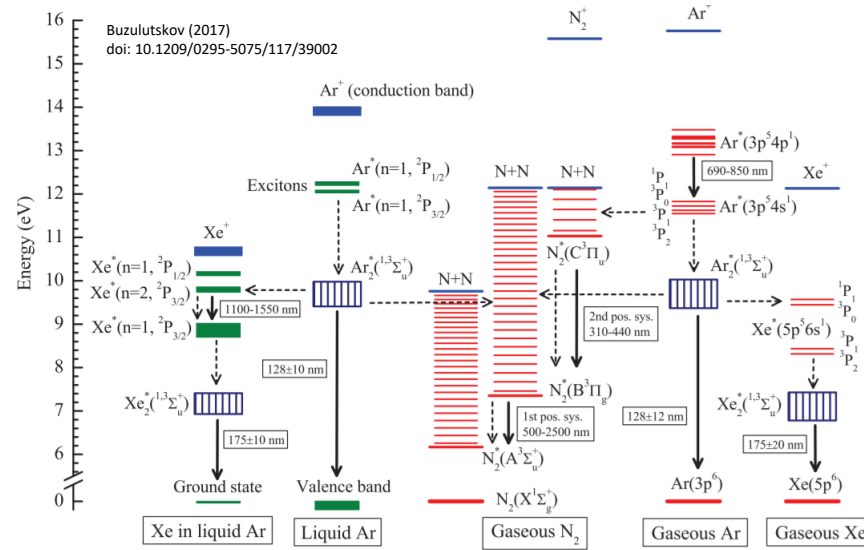


Порог ЭЛ в GAr 4 Тд.

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

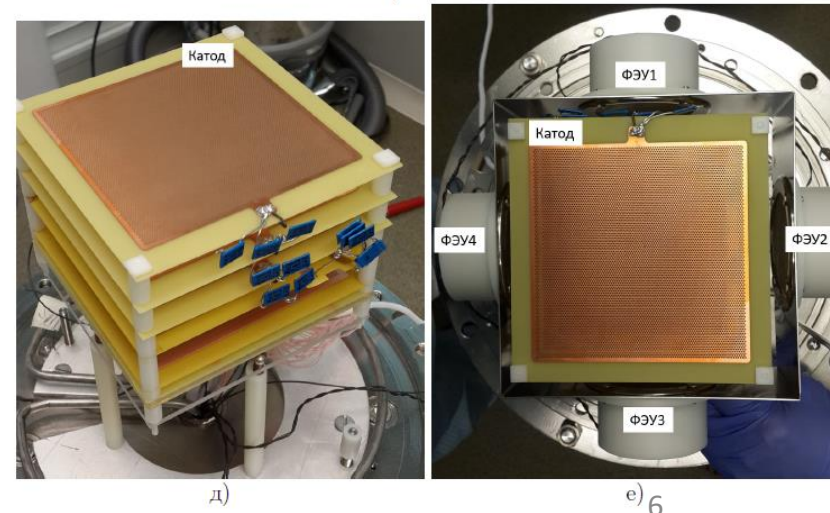
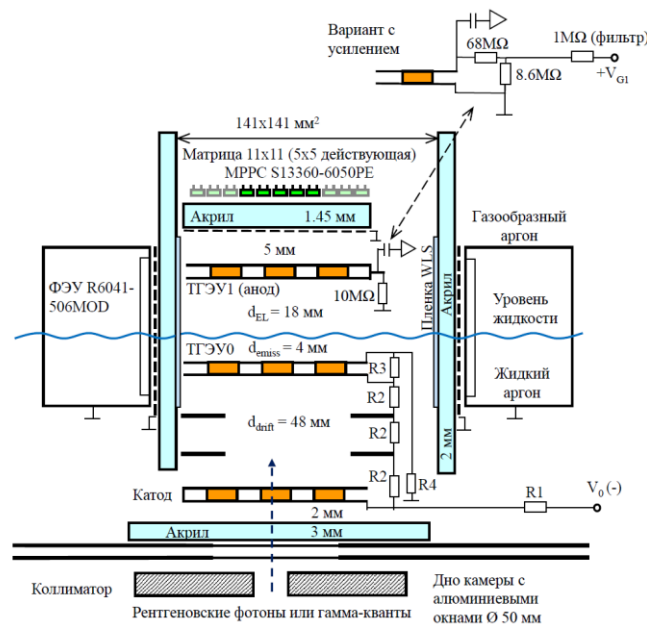
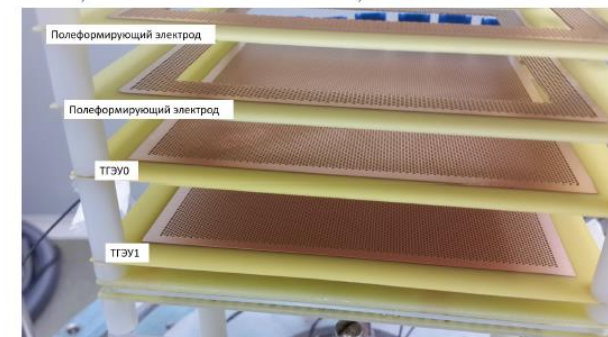
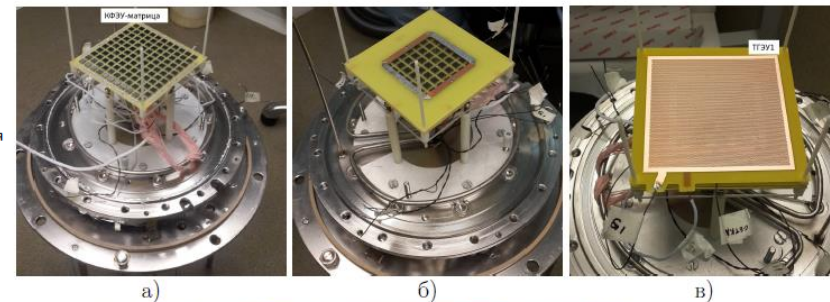
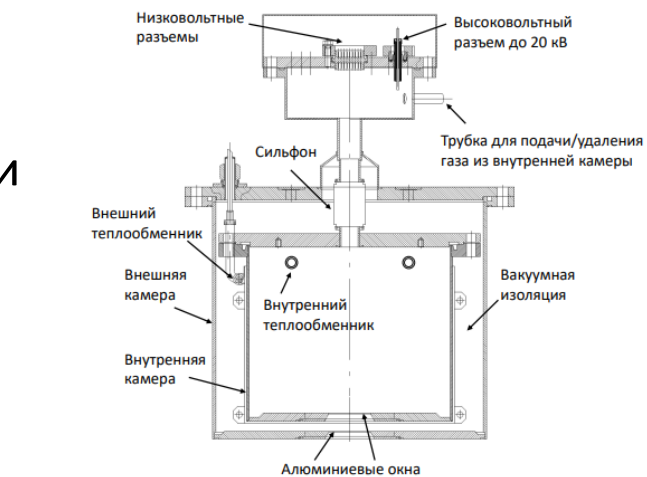
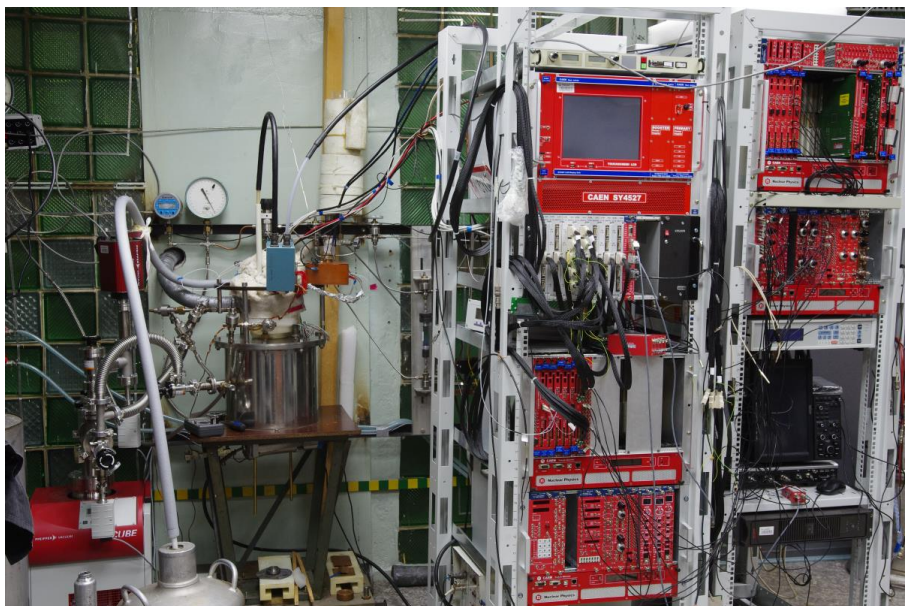
- Атомарная электролюминесценция. Только в GAr. $Ar^*(3p^5 4p^1) \rightarrow Ar^*(3p^5 4s^1)$. Излучение 700-850 нм, <100 нс. Порог ЭЛ в GAr 5 Тд.

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



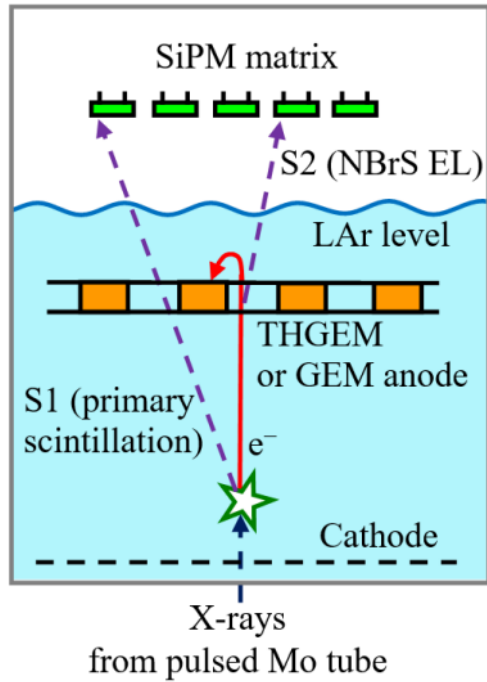
Экспериментальная установка

- Экспериментальная установка состояла из нескольких подсистем:
 - криостата, состоящего из внутренней и внешней камеры
 - источников рентгеновского, гамма- и альфа-излучения
 - криогенно-вакуумной системы
 - системы питания и сбора данных

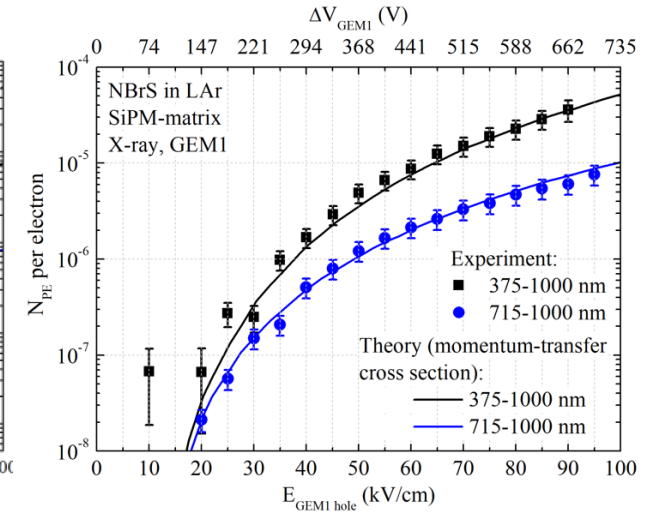
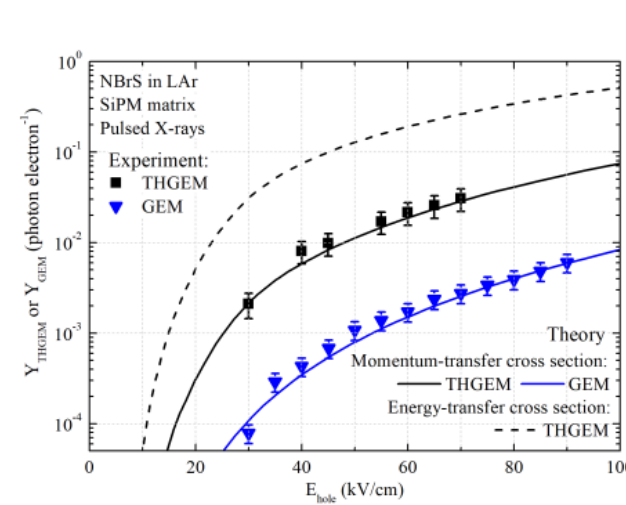
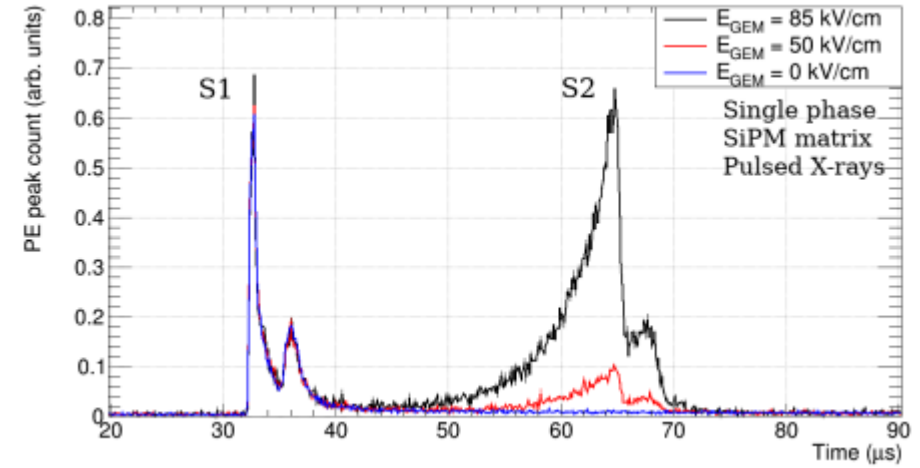
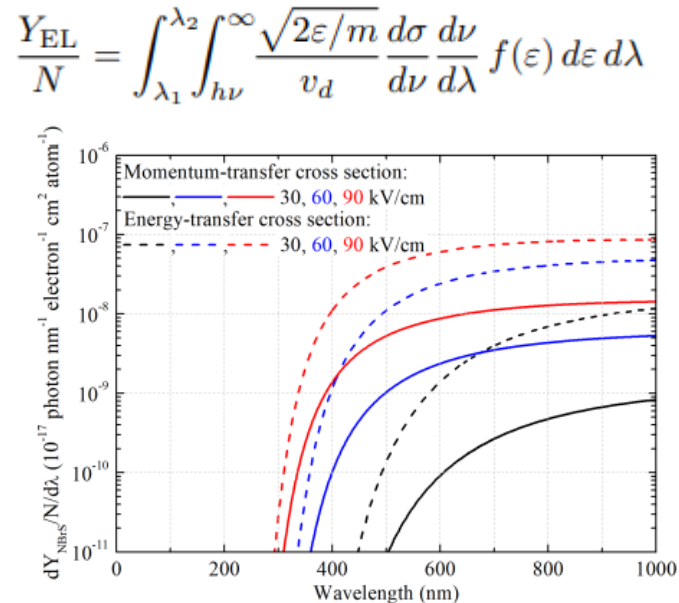


Электrolюминесценция в жидкости в видимом диапазоне

Показано, что в жидком аргоне можно наблюдать ЭЛ в видимом диапазоне при электрических полях ~ 80 кВ/см за счет эффекта тормозного излучения, что значительно ниже порога ~ 800 кВ/см, обусловленного эксимерным излучением в ВУФ диапазоне.



$$\frac{d\sigma}{d\nu} = \frac{8 r_e}{3 c} \frac{1}{h\nu} \left(\frac{\varepsilon - h\nu}{\varepsilon} \right)^{1/2} \times [(\varepsilon - h\nu)\sigma_{el}(\varepsilon) + \varepsilon\sigma_{el}(\varepsilon - h\nu)]$$



Электrolюминесценция в жидкости в видимом диапазоне

Исследование ЭЛ в жидком аргоне открывает новые возможности в использовании однофазных детекторов для регистрации WIMP и упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядрах.

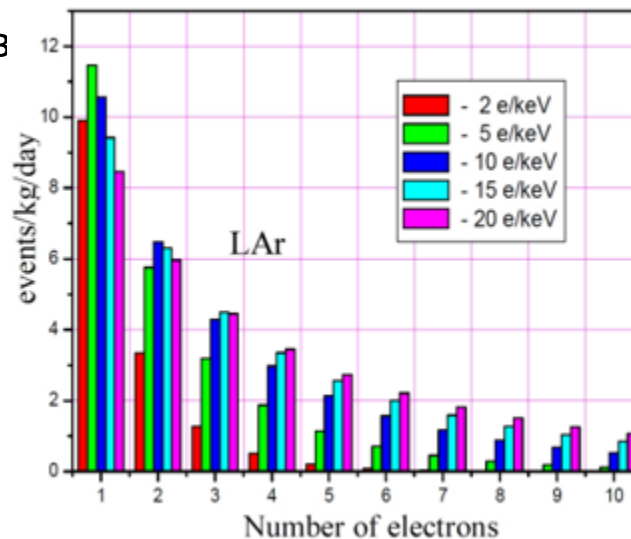
Можно отказаться от использования газовой фазы:

- источников задержанных электронов, вызывающих появление фоновых сигналов;
- большую стабильность детектора по сравнению с аналогами за счет подавления электрических пробоев как в рабочей части детектора, так и на различных разъемах.

- Phys. Rev. Lett. 2023. 131-241001
- Патент на изобретение № 2819555:
“Гибридный низкофоновый детектор на основе благородных газов”

*Гибридный, т.к. считывание не только сцинтилляционного, но и ионизационного сигнала в жидкости.

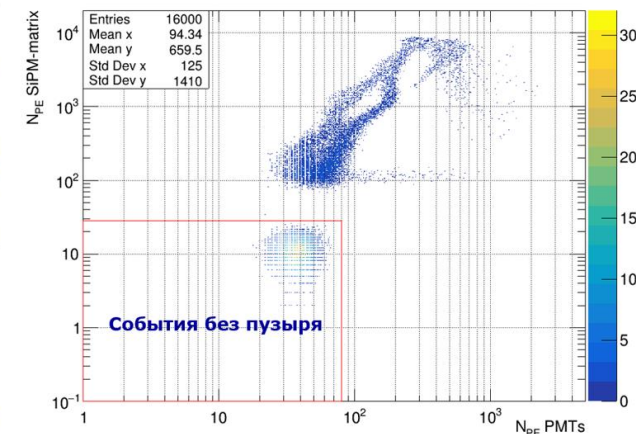
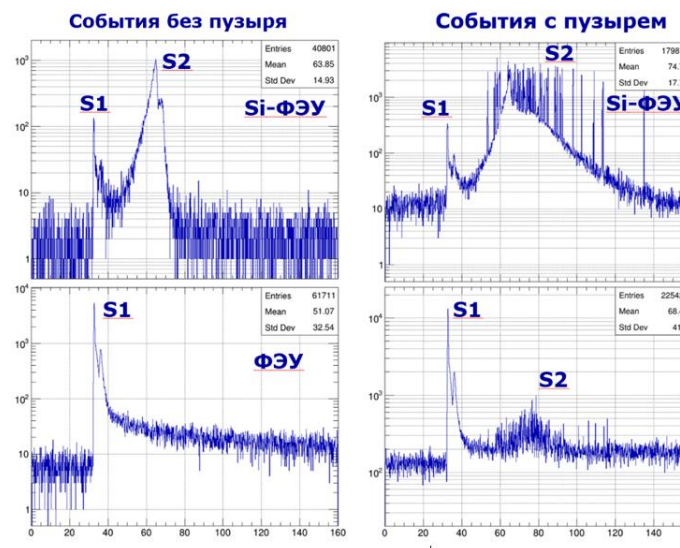
Akimov et al. doi:10.1088/1748-0221/4/06/P06010



При когерентном рассеянии нейтрино низкое энерговыделение (<1 кэВnr).

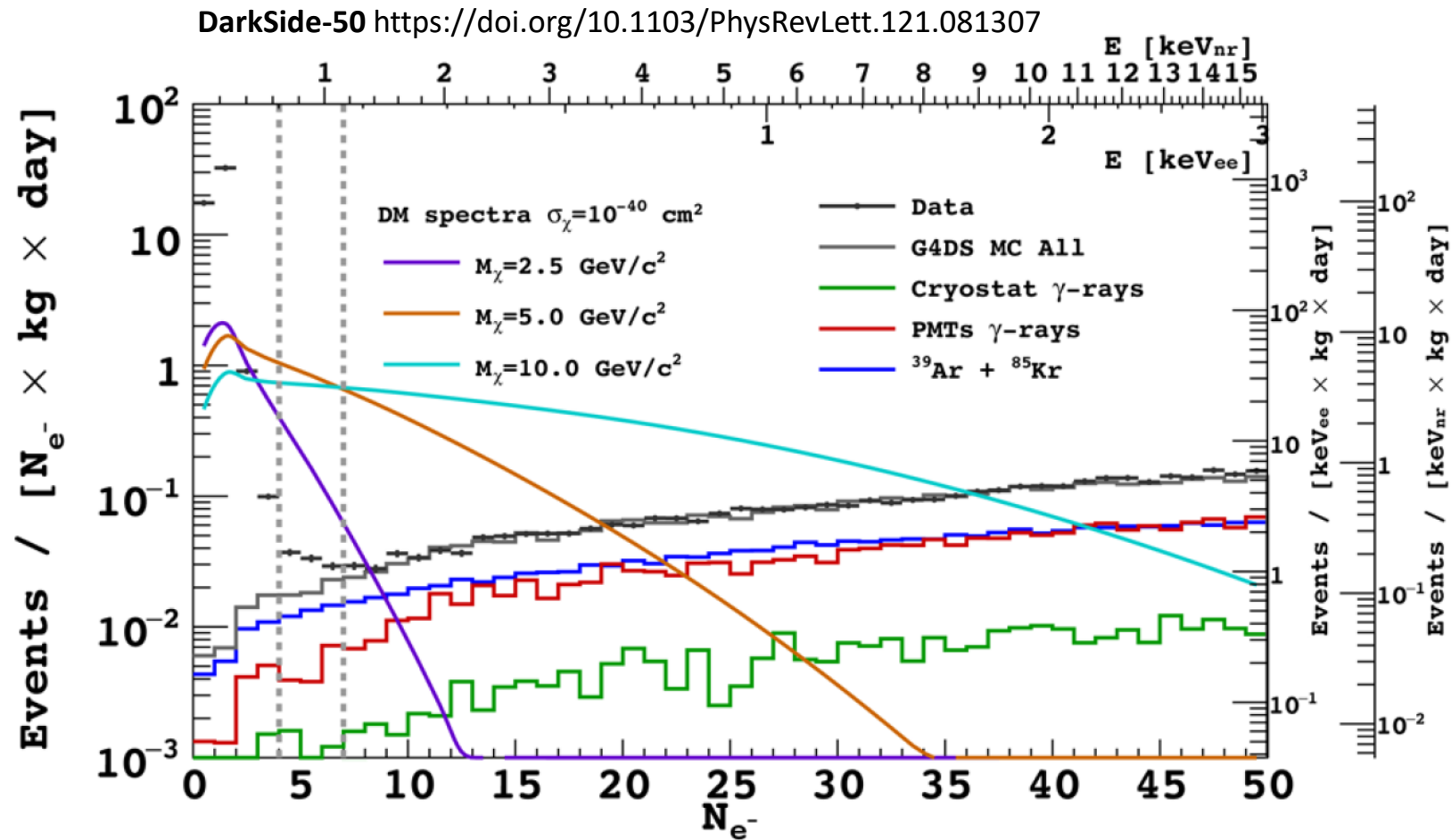
$10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-2}$
(1 ГВт, 10 метров от реактора)

Стоит отметить, что имеется и ряд недостатков у гибридного детектора.



Результаты поиска темной материи в эксперименте DarkSide-50

В эксперименте DarkSide с детектором на основе жидкого аргона наблюдается избыток сигнала в области малых масс. Одна из возможных причин – наличие задержанных электронов на границе раздела фаз. Использование однофазного детектора, вероятно, смогло решить эту проблему. Необходимы дальнейшие исследования.



Выводы

- Показано, что в жидком аргоне можно наблюдать ЭЛ в видимом диапазоне при электрических полях ~ 80 кВ/см за счет эффекта тормозного излучения, что значительно ниже порога ~ 800 кВ/см, обусловленного эксимерным излучением в ВУФ.
- Данный результат является первым в мире наблюдением ЭЛ в жидком аргоне в видимом диапазоне и измерением ее абсолютного световыхода.
- Исследование ЭЛ в жидком аргоне открывает новые возможности в использовании однофазных детекторов для регистрации WIMP и упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядрах.

Спасибо за внимание!

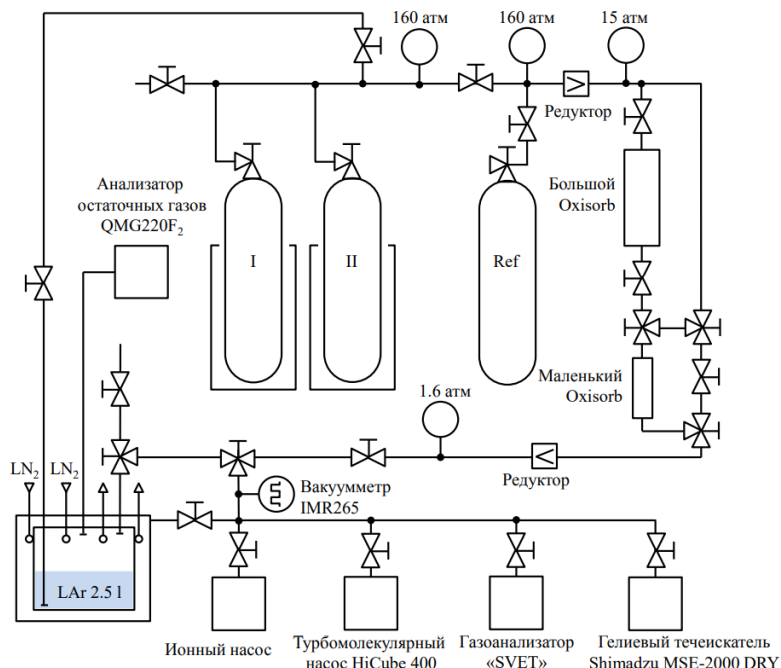
Проблемы масштабирования двухфазного детектора

Есть несколько проблем со сместителем спектра:

- нестабильность светосбора на больших временных масштабах из-за растворения ТФБ в жидком аргоне и отслаивания от подложки в криогенных условиях [<https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/02/P02021>]
- наличие эффектов старения ТФБ [<https://doi.org/10.1364/AO.380185>]
- наличие медленных компонент излучения ТФБ [<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-7789-x>]
- Регистрация ВУФ возможна напрямую при помощи кремниевых фотоумножителей (КФЭУ), но ВУФ имеет малую длину поглощения в жидком аргоне в присутствии примесей (~ 1 м), поэтому возникает ограничение на максимальный размер детектора <https://doi.org/10.1088/1748-0221/8/07/P07011>
- Другой возможный вариант – использование альтернативной схемы оптического считывания без сместителя спектра, регистрируя излучение в видимом [<https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2018.06.005>] и ИК-диапазоне [<https://doi.org/10.1088/1748-0221/5/08/P08002>] напрямую.
- Регистрация света в видимом диапазоне напрямую, без сместителей спектра, позволила бы решить эти проблемы.

Экспериментальная установка. Криогенно-вакуумная система.

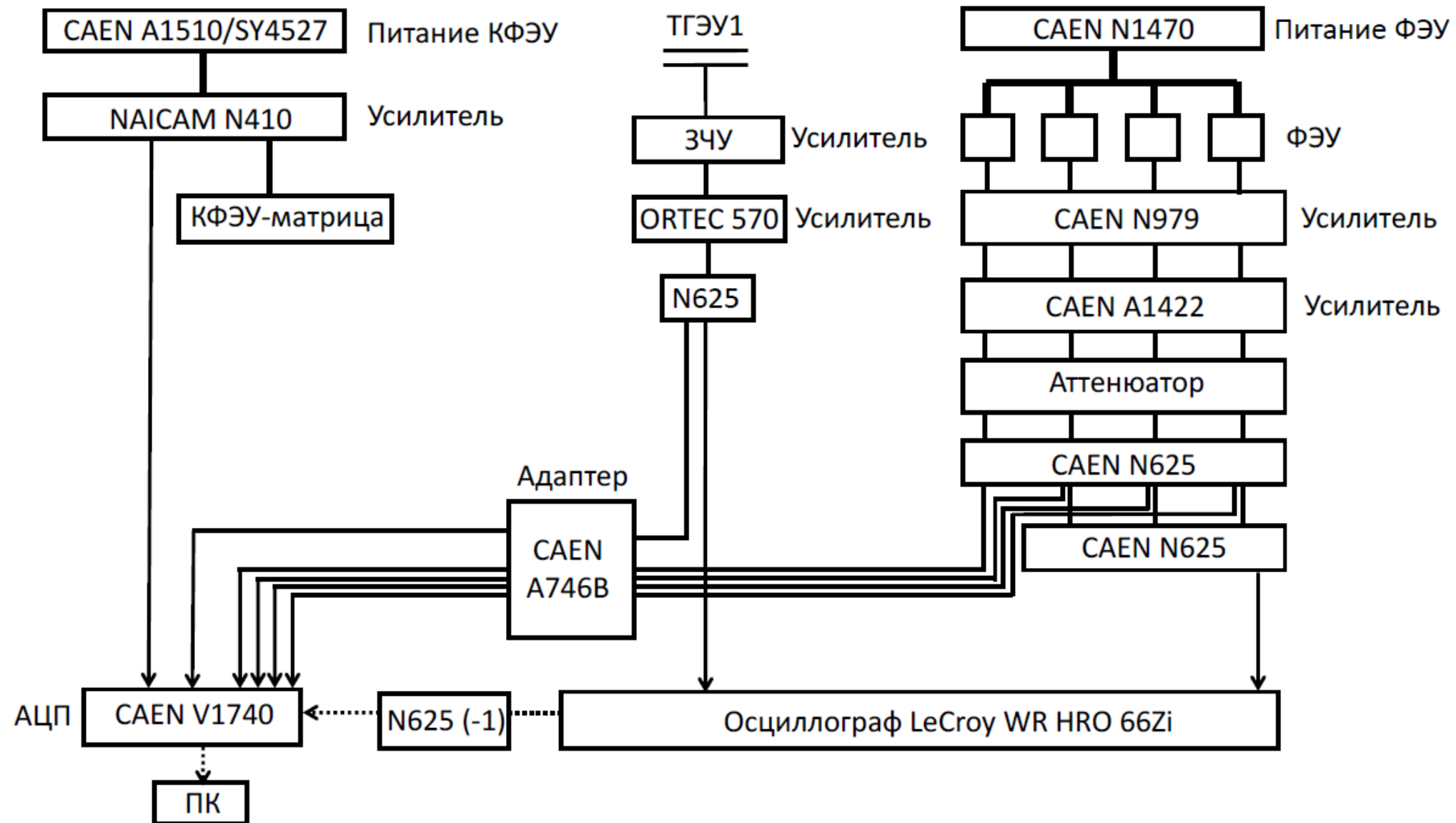
- Для измерений использовался аргон с начальной чистотой 99.9998% и метан с начальной чистотой 99.95%.
- В начале каждого сеанса измерений криогенная камера откачивалась и заполнялась чистым аргоном. Процедура повторялась несколько раз.
- Далее газовая смесь из баллона из нержавеющей стали объемом 40 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.



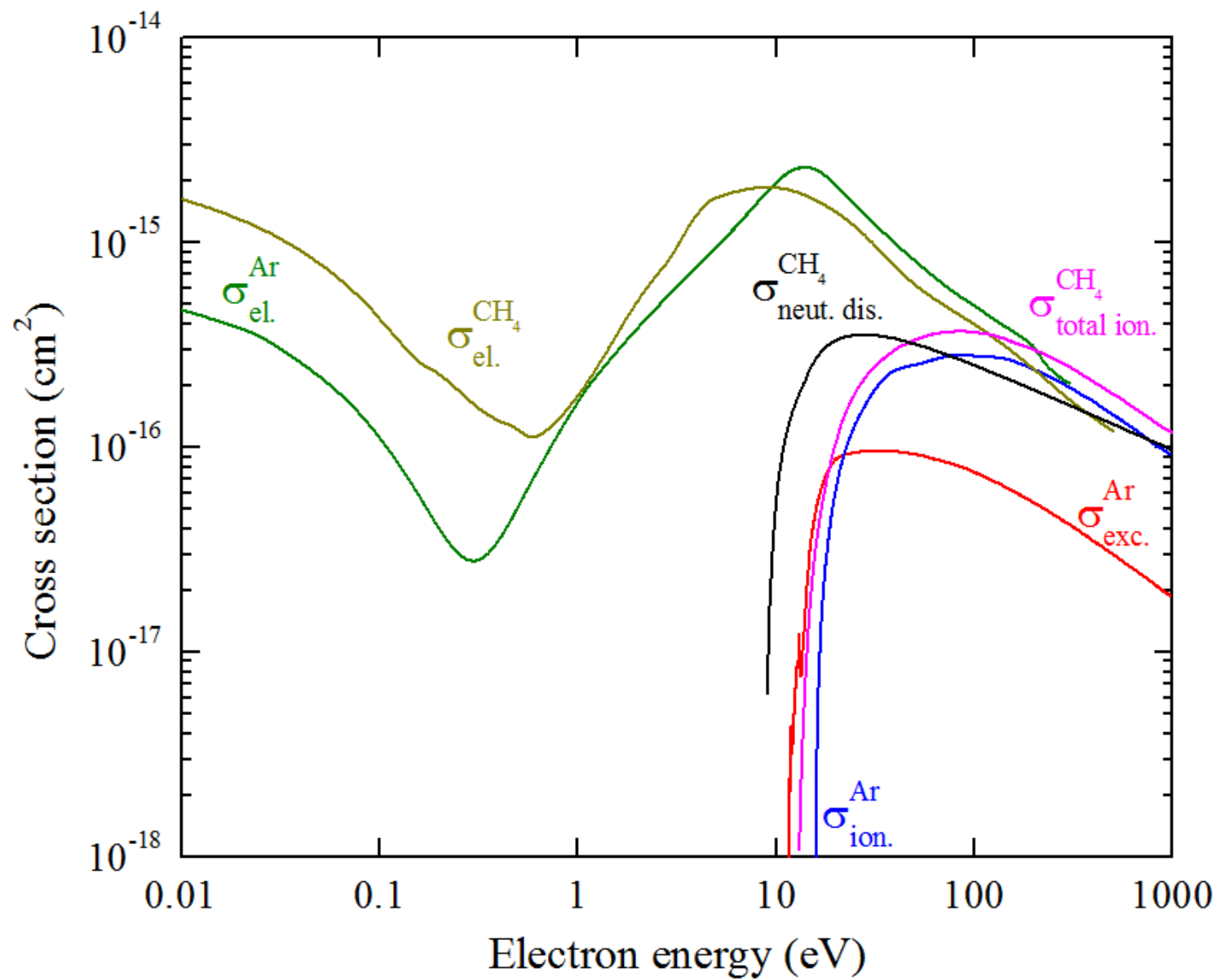
	Баллон с Ar	Баллон с CH ₄
N ₂	< 0.8 ppm	< 200 ppm
Углеводороды	< 0.1 ppm	-
Углеводороды (кроме CH ₄)	-	< 200 ppm
CO ₂	< 0.1 ppm	< 10 ppm
CO	-	< 5 ppm
O ₂	< 0.5 ppm	< 10 ppm
H ₂ O	< 0.5 ppm	< 10 ppm
Всего	< 2 ppm	< 500 ppm

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

Экспериментальная установка. Система питания и сбора данных.

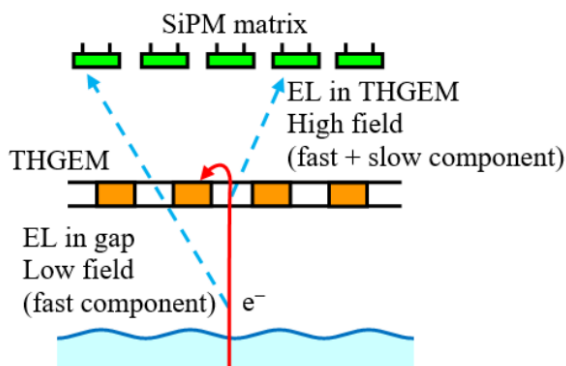


Сечения

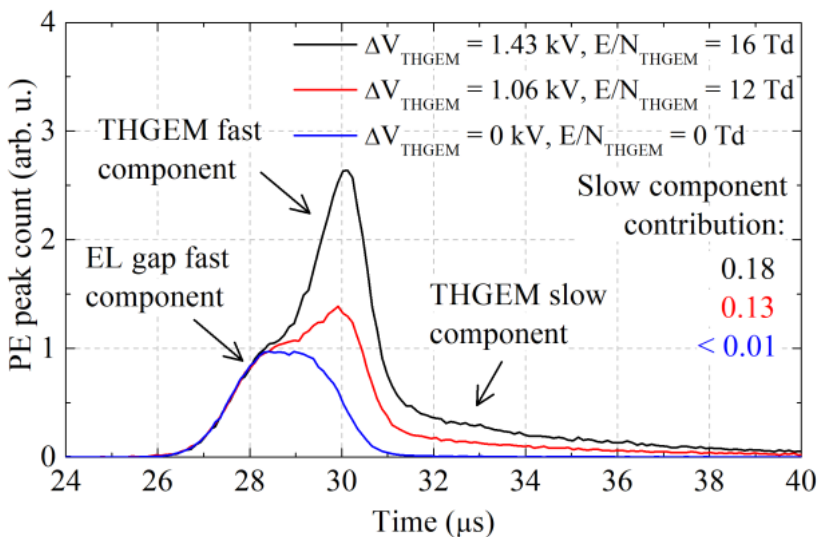
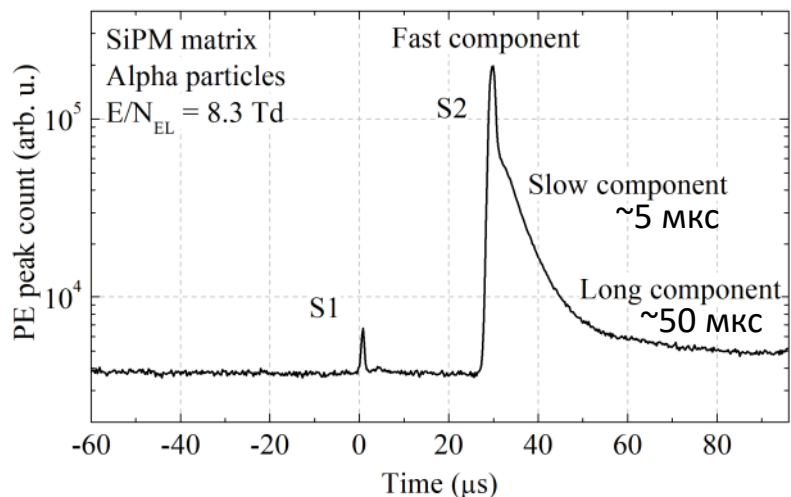


Медленные компоненты ЭЛ сигнала в видимом диапазоне

При изучении ЭЛ в видимом диапазоне были обнаружены необычные медленные компоненты сигнала с постоянными времени ~ 5 мкс и ~ 50 мкс.

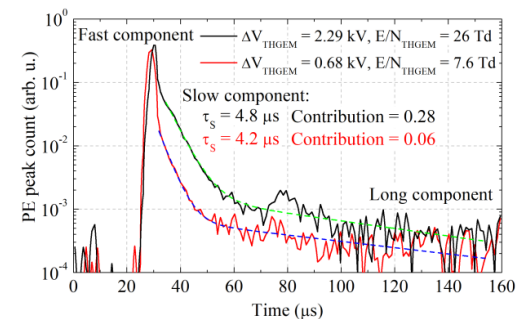
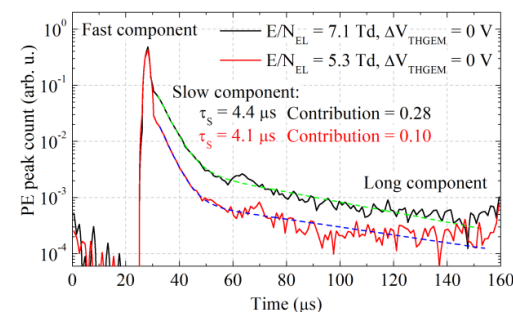
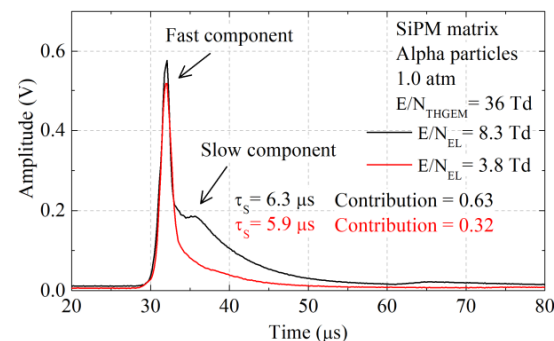
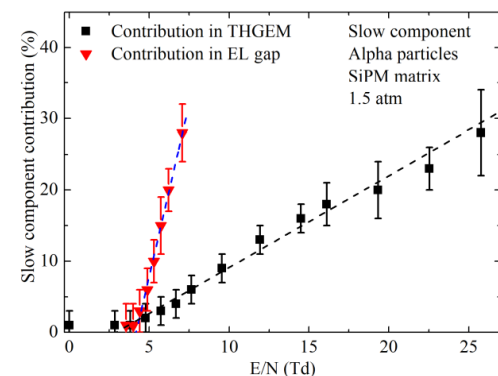


Необычным является то, что вклад этих компонент в общий сигнал возрастает при увеличении электрического поля.

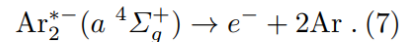
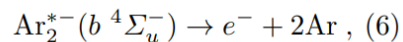
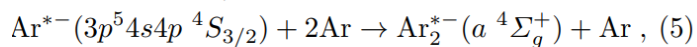
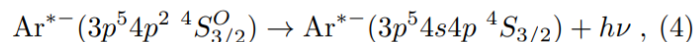
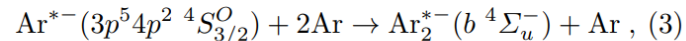
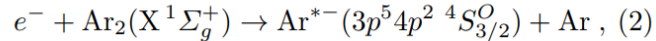
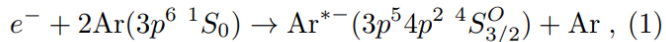
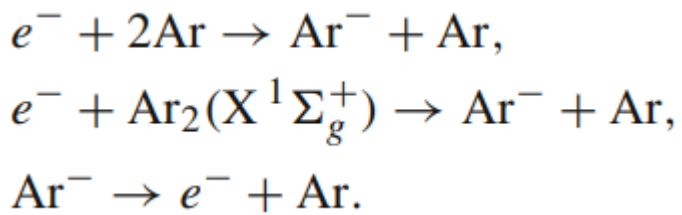
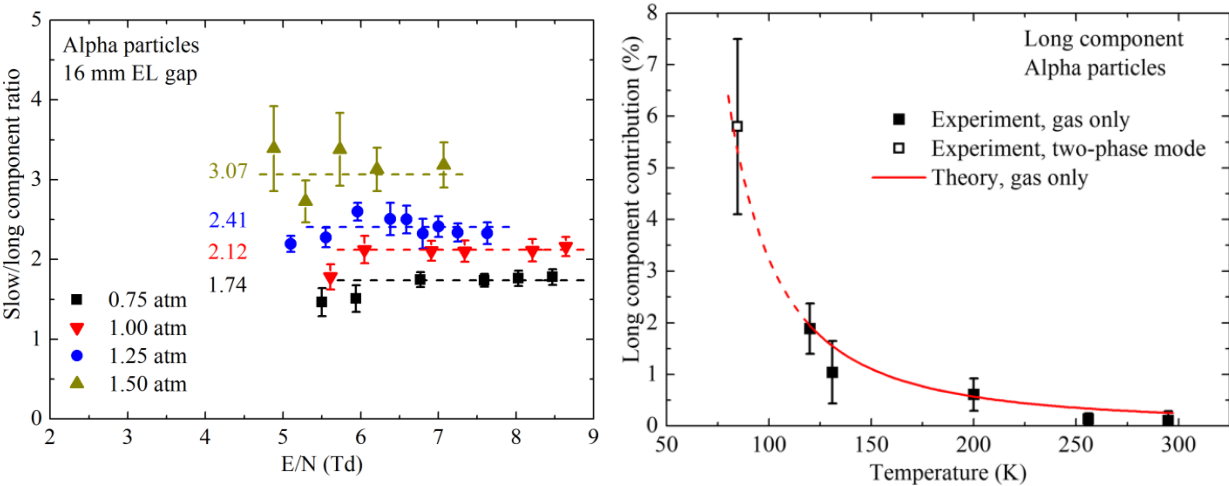


Особенности:

- компоненты возникают выше порога 5 Тд и присутствуют как в световом, так и в зарядовом сигнале;



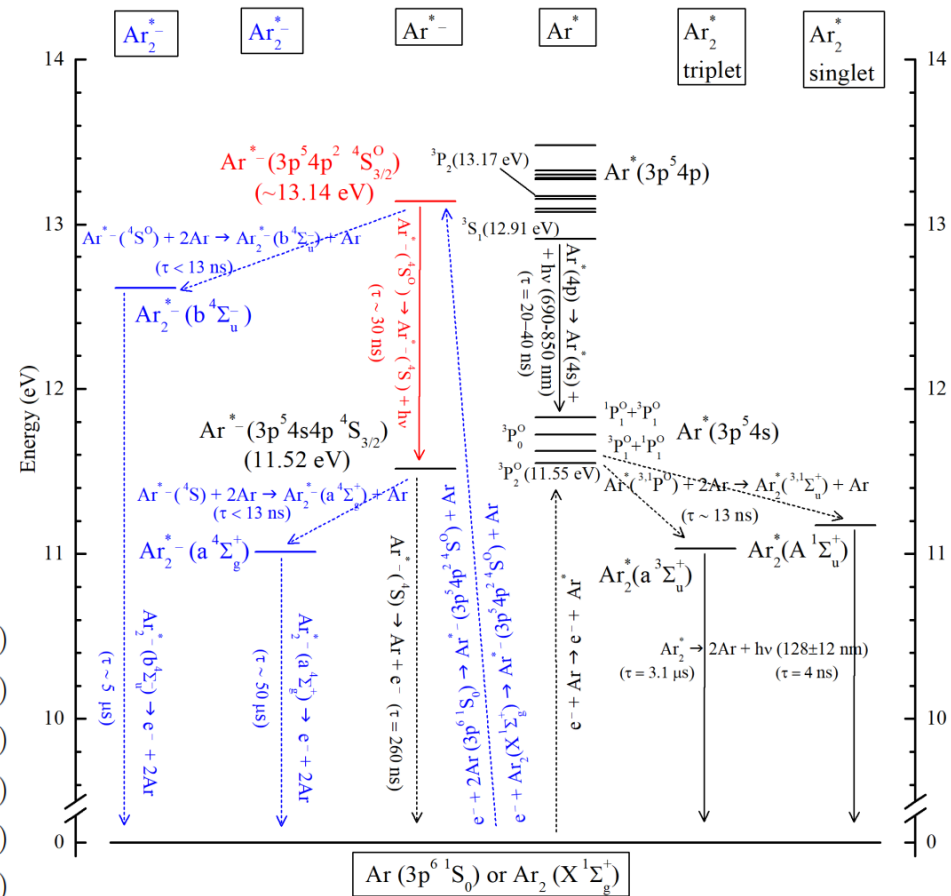
- соотношение вкладов компонент не зависит от электрического поля и существенно меняется с давлением;
- при увеличении температуры медленные компоненты уменьшаются.



Разработана модель:

Этап 1: образуются отрицательные атомные ионы аргона Ar^- , которые являются дочерними состояниями возбужденных атомных состояний Ar^* .

Этап 2: образуют отрицательные молекулярные возбужденные ионы с временем жизни ~ 5 и ~ 50 мкс.



- Eur. Phys. J. C. 2023. 83-899
- Eur. Phys. J. C. 2023. 83-848

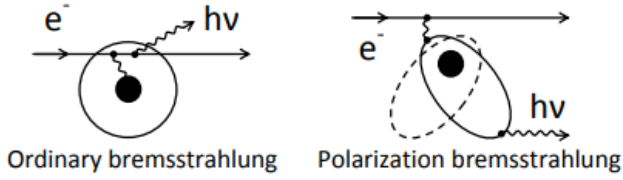


Figure 1: Schematic representation of the ordinary and polarization bremsstrahlung processes.

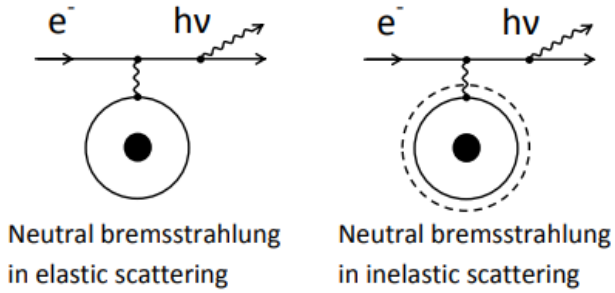


Figure 2: Schematic representation of the neutral bremsstrahlung process in elastic and inelastic electron scattering.

$$e^- + A \rightarrow e^- + A + hv ,$$

$$e^- + A \rightarrow e^- + A^* + hv .$$

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

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

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

in (photon cm²)/(electron atom nm) .

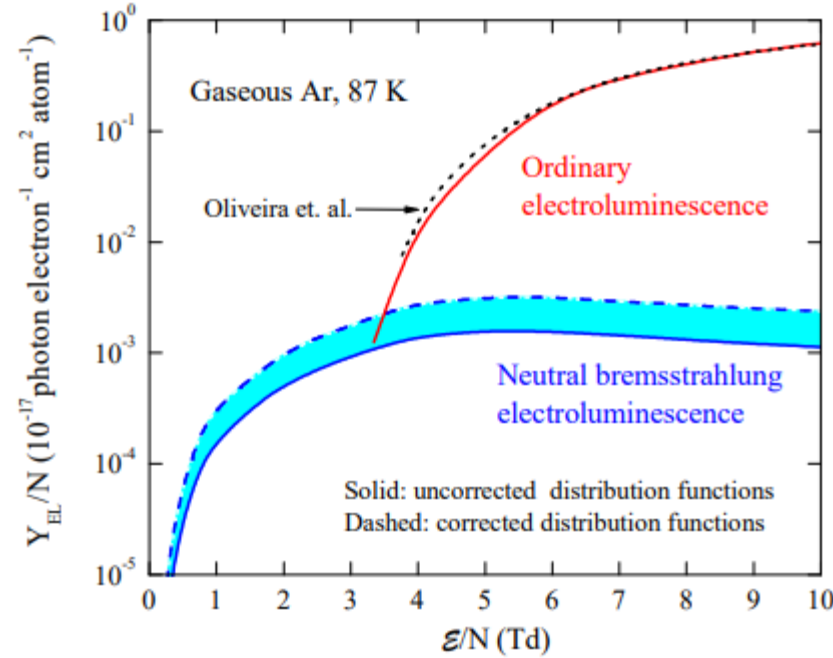


Figure 13: Reduced ordinary EL yield and that of neutral bremsstrahlung at 0-1000 nm in gaseous Ar as a function of the reduced electric field. The quantity was calculated for two types of distribution functions: those obtained using Boltzmann equation solver (uncorrected distribution functions) and 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.

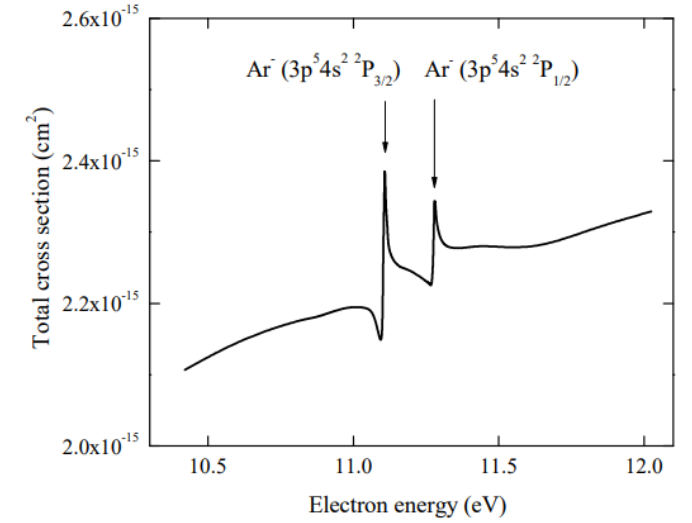
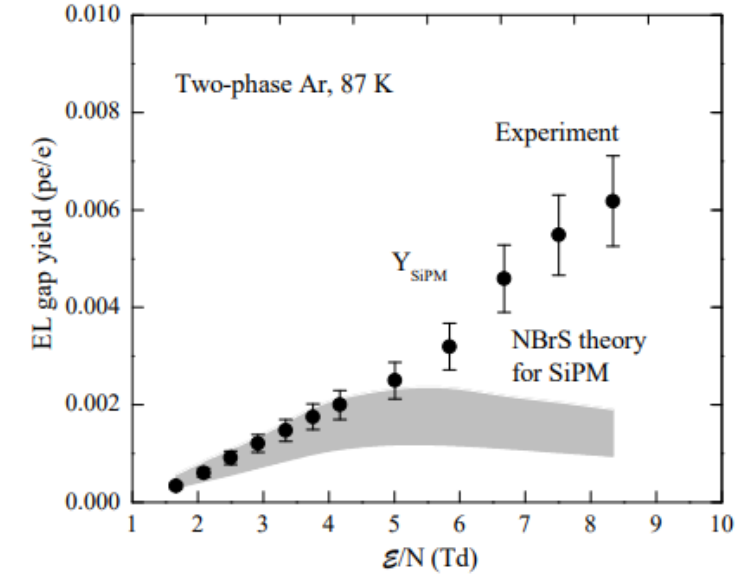


Figure 4: Experimental cross section for electron scattering from Ar around Feshbach resonances [43]



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>

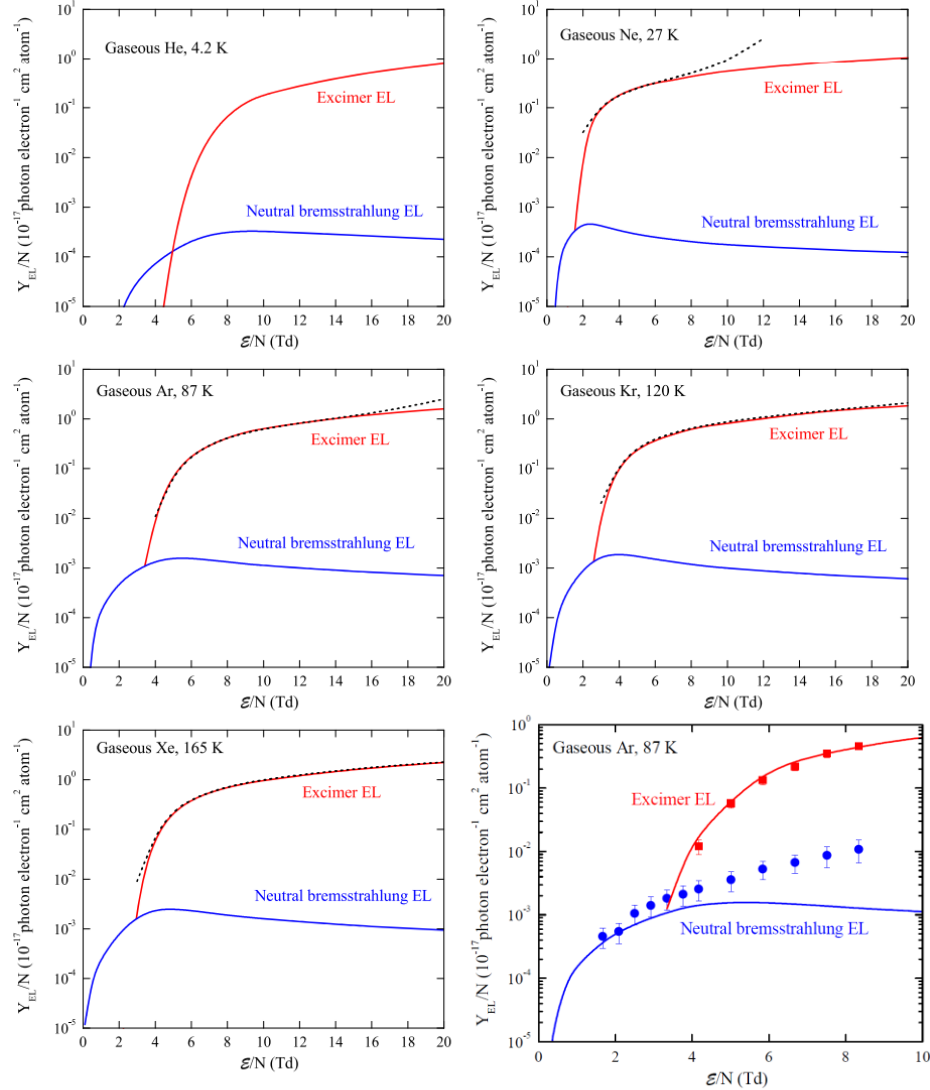
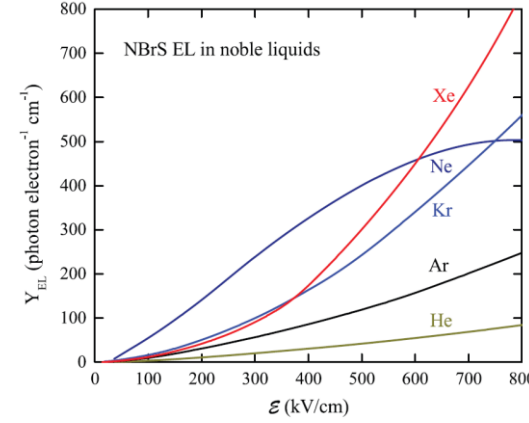


Fig. 12 Reduced EL yield for NBrS EL at 0–1000 nm and that of excimer EL in noble gases as a function of the reduced electric field, calculated in this work using Boltzmann equation solver (solid lines).

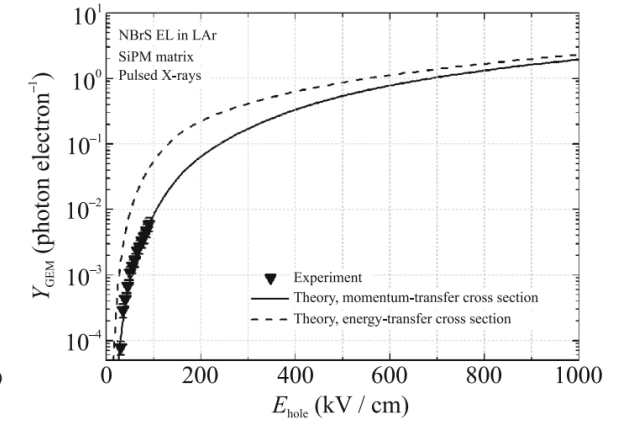
For comparison, the EL yield of excimer EL, calculated using micro-scope approach [9], is shown (dashed lines)

NBrS and excimer electroluminescence in noble liquids

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

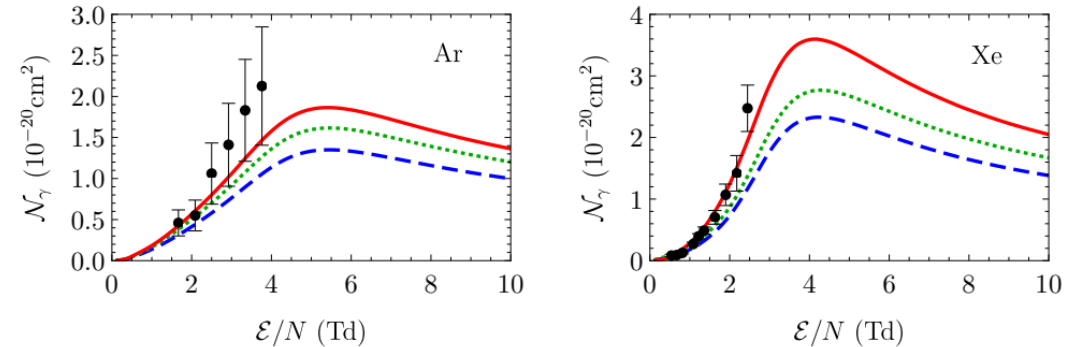


<https://doi.org/10.1134/S0021364023601847>



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>



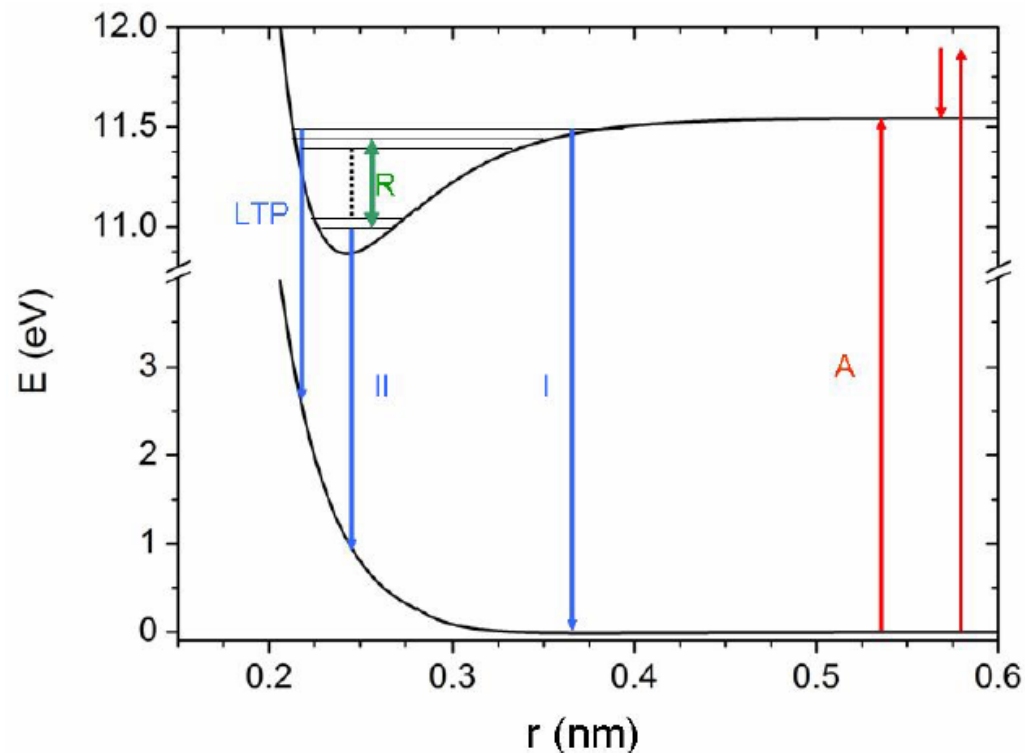


Fig. 2: (Colour on-line) Schematic level diagram of the lowest-lying atomic and molecular states of argon. Transitions from vibrationally relaxed molecules to the repulsive ground state are marked II. These transitions lead to the so-called second excimer continuum of the rare gases. Transitions marked 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.

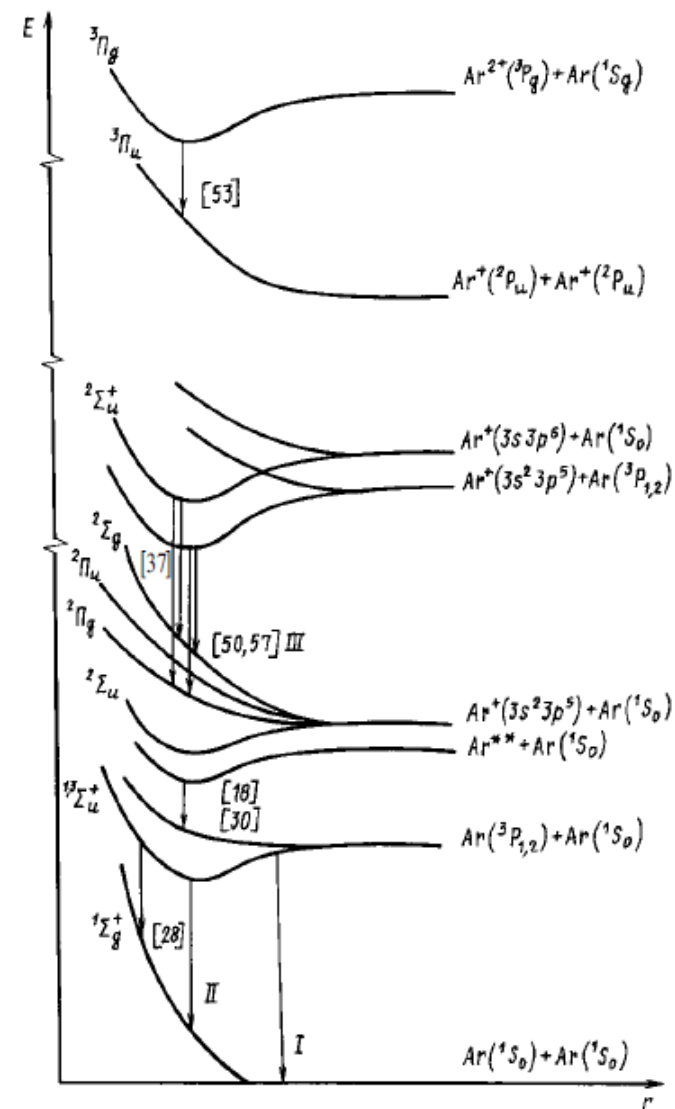


Рис.1. Потенциальные кривые молекул и ионов молекул инертных газов. Стрелками показаны димерные переходы (I, II – соответственно переходы в первый и второй континуумы) и переходы в третий континуум согласно нашей (III) и другим (прочие переходы) точкам зрения.