

Изучение первичных сцинтилляций в видимом диапазоне в жидком аргоне и его смесях с метаном

A. Bondar, E. Borisova, A. Buzulutskov, E. Frolov, V. Nosov,
V. Oleynikov, A. Sokolov

Budker Institute of Nuclear Physics (Budker INP), Novosibirsk, Russia
Novosibirsk State University (NSU), Novosibirsk, Russia

Экспериментальный семинар ИЯФ
24/12/2021

План доклада

- Введение.

Мотивация:

(1) Проблема первичных сцинтилляций в жидком аргоне в видимом диапазоне

(2) Разработка нейтронного вето-детектора нового типа - на основе жидкого аргона.

- Экспериментальная установка

- Изучение первичных сцинтилляций в LAr в видимом диапазоне.

- Изучение первичных сцинтилляций в LAr+CH₄ в видимом диапазоне.

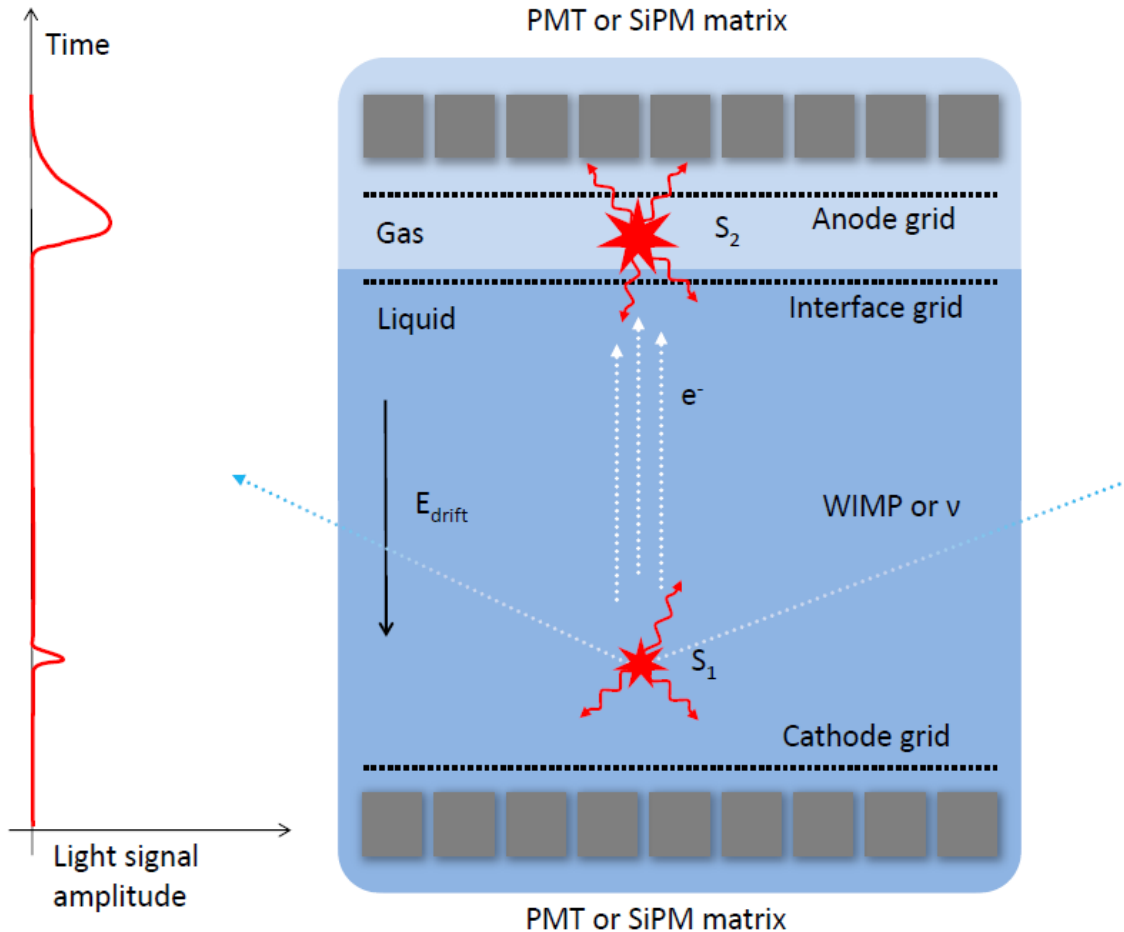
- Обсуждение результатов и компиляция данных по влиянию добавки CH₄ в LAr

- Выводы и заключение

~ 40 мин.

Введение

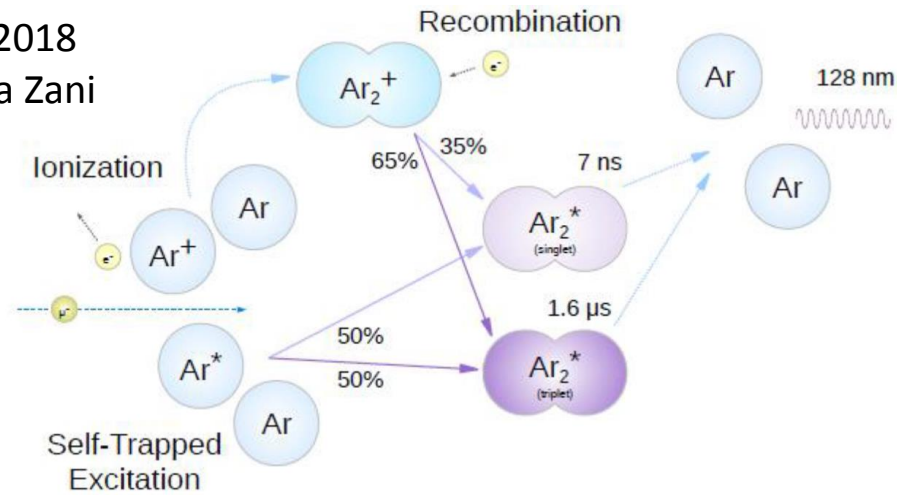
Принцип работы двухфазного детектора темной материи



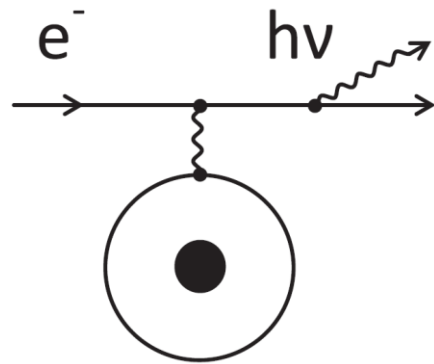
- При прохождении ионизирующей частицы через вещество происходит возбуждение и ионизация атомов.
- При снятии возбуждения атомов и рекомбинации e^- происходит излучение, называемое сигналом первичной сцинтилляции или S_1 сигналом.
- Некоторая часть электронов под действием эл. поля эмитируется в газовую фазу, где в результате эффекта электролюминесценции (ЭЛ) образуется задержанный по времени вторичный сцинтилляционный сигнал, называемый сигналом S_2 .

Механизмы излучения

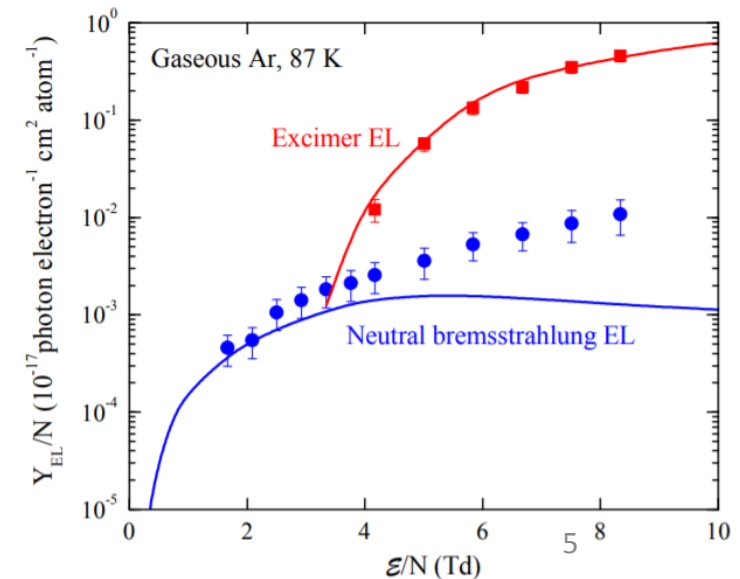
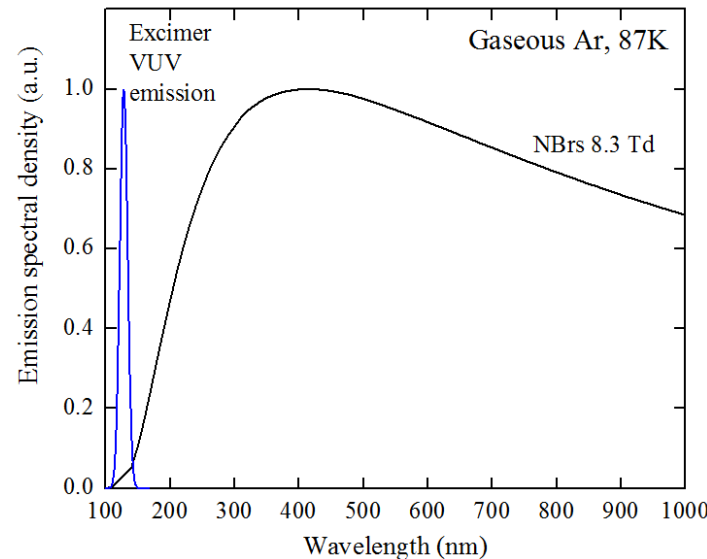
CPAD 2018
Andrea Zani



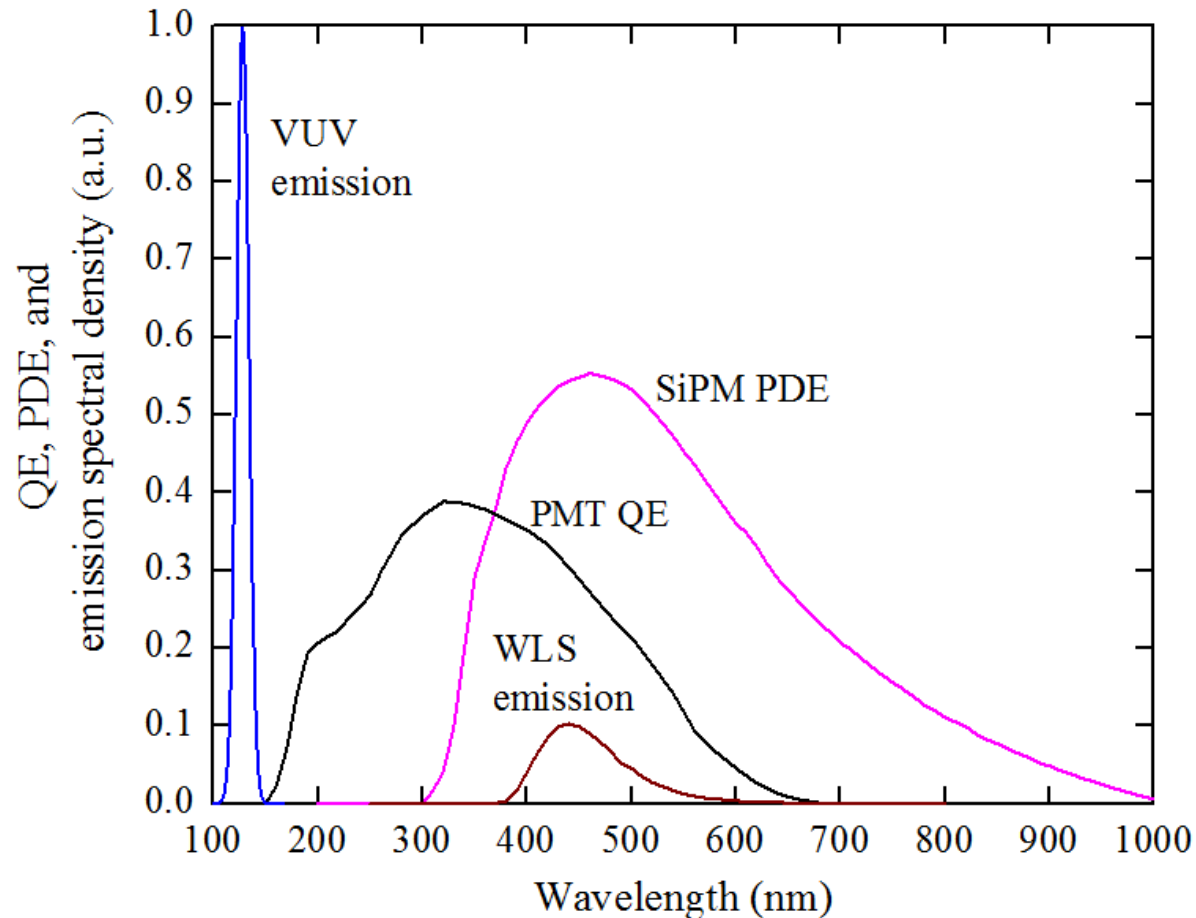
- Доминирующим механизмом образования S1 и S2 сигналов является эксимерный механизм излучения. При ионизации и возбуждении атомов Ar образуются эксимеры – возбужденные молекулы Ar_2^* . Эксимеры распадаются с временными константами 7 нс и 1.6 мкс (в жидкости) с излучением в ВУФ со средней длиной волны 128 нм.
- Механизм тормозного излучения электронов на нейтральных атомах (NBrS). При рассеянии e^- в поле атома происходит излучение фотонов с непрерывным спектром. Пока NBrS изучен только в газе.



Neutral bremsstrahlung
in elastic scattering



Проблема первичных сцинтилляций в жидком аргоне в видимом диапазоне

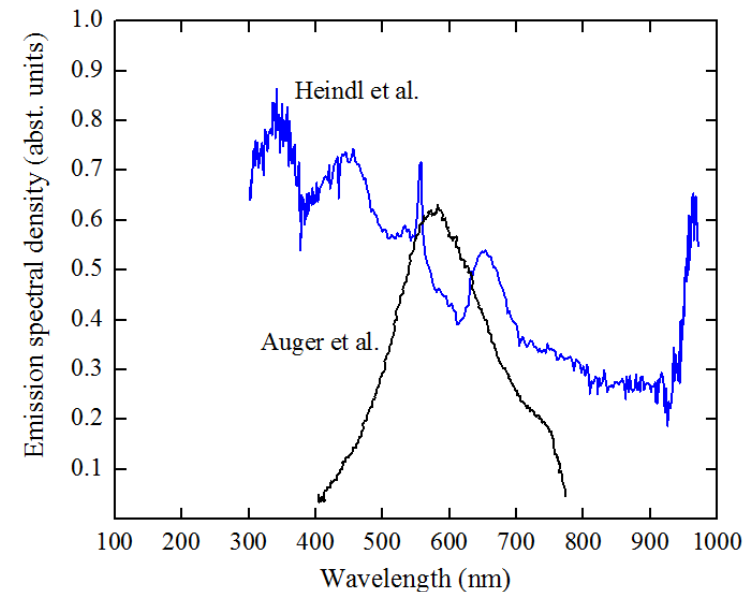


- Первичные сцинтилляции в LAr имеют высокую интенсивность (~40000 фот./МэВ) в ВУФ (128нм), однако для регистрации такого коротковолнового излучения необходимо использовать переизлучатель (см. рис).
- Проблема переизлучателя - отслоение с поверхности, растворение в LAr (изменение светосбора), деградация со временем.
- Другая проблема при регистрации ВУФ - рэлеевское рассеяние в объеме детектора, которое приводит к снижению светосбора.
- Наличие излучения в видимом диапазоне в чистом LAr позволило бы избежать этих и многих других проблем в регистрации излучения.
- В некоторых работах было показано наличие слабого излучения в видимом диапазоне, в других работах такое излучение отсутствовало. Причем на данный момент нет понимания механизма излучения.
- **Первая цель данной работы - измерить абсолютный световыход в чистом LAr в видимом диапазоне и попытаться понять механизм излучения.**

Обзор текущих результатов по первичным СЦИНТИЛЛЯЦИЯМ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ

- Работы по данной теме можно условно разделить на два типа по источнику ионизации: с использованием e^- /гамма-квантов/X-rays и альфа-частиц.
- В работе Heindl et al. 2010 г. был получен спектр излучения при облучении LAr 12 кэВ e^- .
- Используя спектр из Heindl et al., в нашей работе 2012 г. был оценен световыход сцинтилляций, составивший около 500 фот./МэВ.
- Однако затем в работе Neumeier et al. 2014 г. не обнаружили излучение в диапазоне 500-3500 нм.
- В работе Alexander et al. 2016 г. было зарегистрировано излучение с быстрой и медленной компонентами.

- В работе Auger et al. 2016 г. был измерен спектр излучения в LAr при пробое ($U=56$ кВ, 3мм).



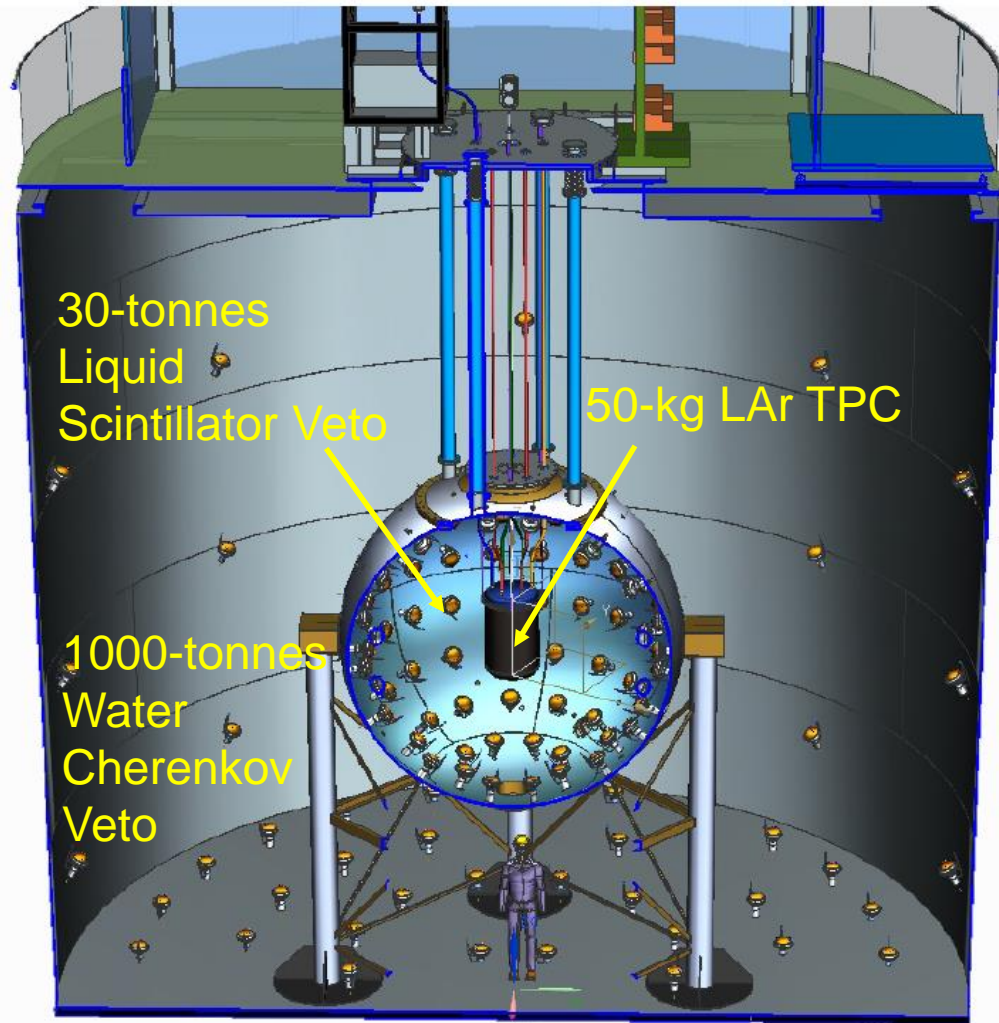
	Источник	Спектр регистрации	Световыход в чистом LAr (400-1000 нм)	Зависимость от эл. поля	Временная структура
Heindl et al. (2010)	12 кэВ e^-	110 -1000 нм	Не измерен	Не измерена	Не измерена
Bondar et al. (2012)	25 кэВ X-rays	400-1000 нм	510 фот./МэВ	отсутствует	Не измерена
Neumeier et al. (2014)	12 кэВ e^-	500-3500 нм	Излучение отсутствует	Не измерена	Не измерена
Alexander et al. (2016)	511 кэВ e^-	715-900 нм	Не измерен	Не измерена	<300нс (~50%), ~1мкс (~50%)
Auger et al. (2016)	$E < 56$ кэВ e^-	400-800 нм	Не измерен	Не измерена	Не измерена ⁷

Обзор текущих результатов по первичным сцинтилляциям в видимом диапазоне

- 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. По оценкам, интенсивность < 10 фот./МэВ.
- В работе Escobar et al. 2018 г. наблюдали излучение в видимом диапазоне, но световыход не был измерен.
- Таким образом, ситуация довольно запутанная, т.к. данные по первичным сцинтилляциям в видимом диапазоне были получены с разными источниками ионизации, в разном спектральном диапазоне, и с разной степенью детализации, поскольку 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.
- В данной работе будут проведены систематические измерения как с X-rays, так и с альфа-частицами, а также будет вычислен световыход, рассмотрена его зависимость от эл. поля, и изучена временная структура излучения.

	Источник	Спектр регистрации	Световыход в чистом LAr (400-1000 нм)	Зависимость от эл. поля	Временная структура
Jones et al. (2015)	5.3 МэВ α	160-650 нм	Излучение не зарегистрировано (световыход < 10 фот./МэВ)	Не измерена	Не измерена
Escobar et al. (2018)	5.4 МэВ α	715-900 нм	Излучение зарегистрировано (световыход не измерен)	Не измерена	Не измерена

Разработка нейтронного вето-детектора нового типа - на основе жидкого аргона

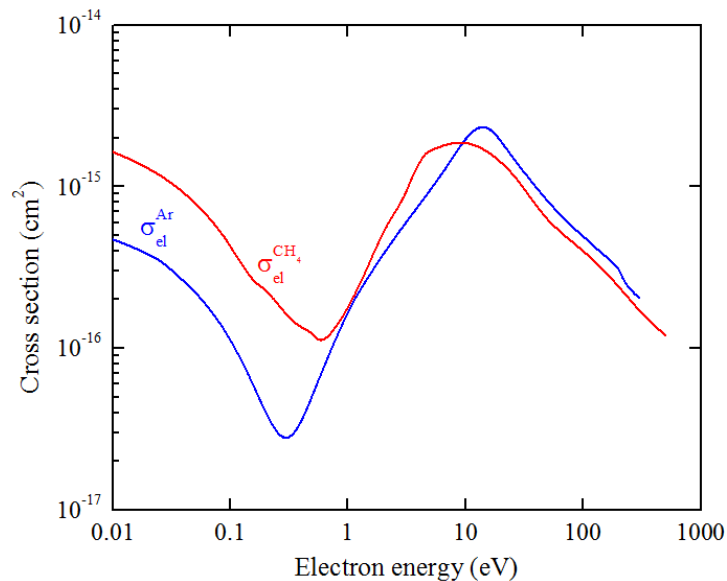
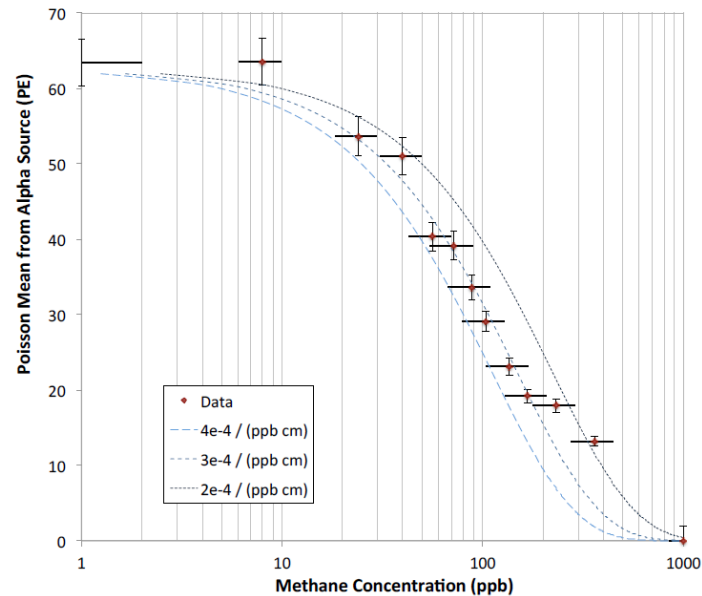


Детектор DarkSide-50

- Мотивация: отказ от пожароопасного органического сцинтиллятора, используемого в нейтронном вето-детекторе.
- Сейчас такой органический сцинтиллятор используется в детекторе DarkSide-50, однако при создании более масштабного детектора, DarkSide-20k, необходимо найти безопасное решение.
- Возможной альтернативой является смесь на основе LAr с добавкой CH₄, где Ar играет роль сцинтиллятора в видимой области, CH₄ - замедлителя нейтронов. Концентрация CH₄ $\geq 1\%$ 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.
- **Вторая цель данной работы - исследовать свойства смеси LAr+CH₄, в частности, измерить абсолютный световыход в видимом диапазоне.**

Первичные сцинтилляции в $LAr+CH_4$

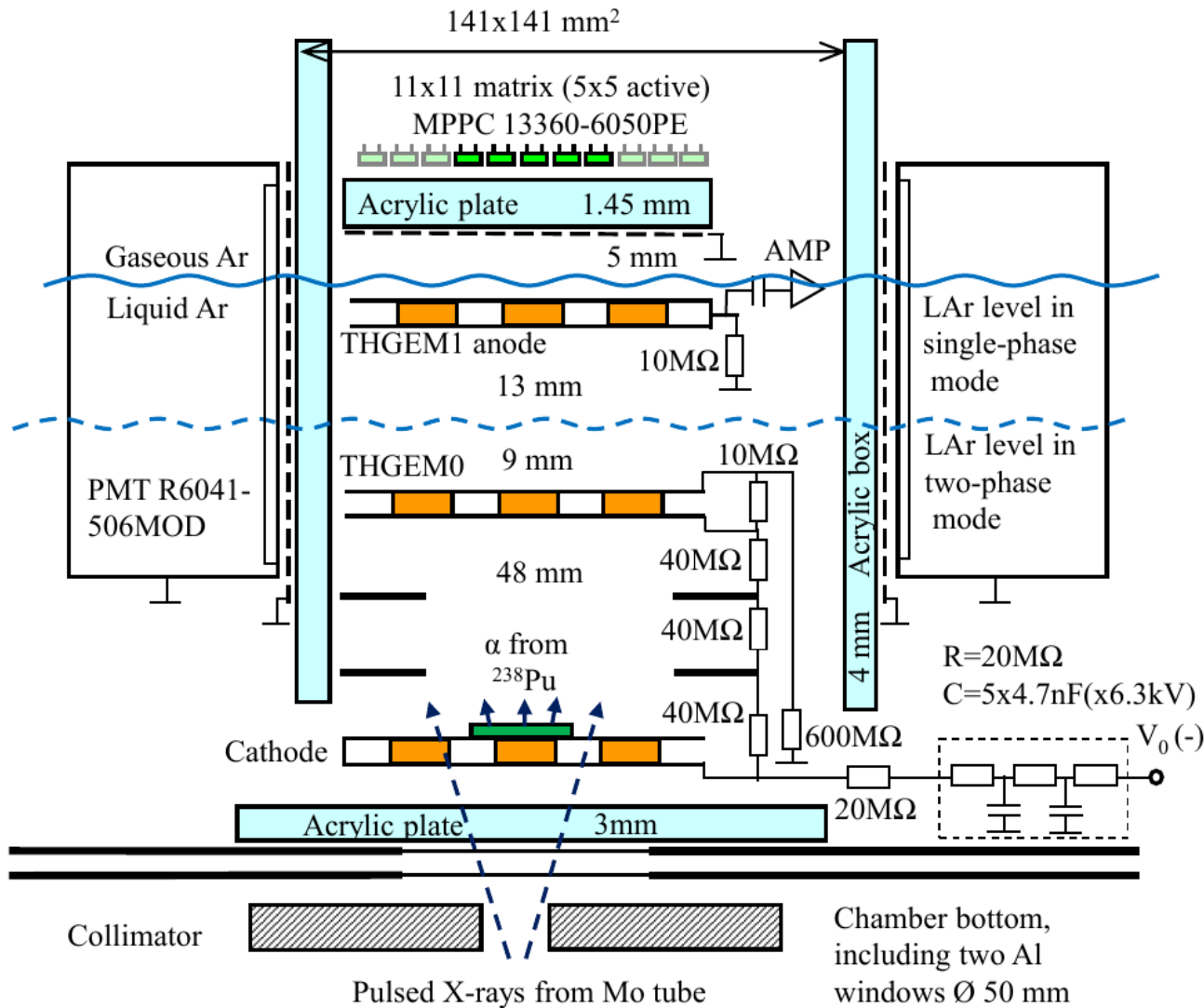
Jones et al. (2015) doi:10.1088/1748-0221/8/12/P12015



- На первый взгляд, такая смесь не может быть использована, т.к. при добавлении всего 1ppm CH_4 в LAr эксимерные сцинтилляции в ВУФ исчезают из-за поглощения света (основной механизм) и эффекта тушения (безызлучательный распад эксимеров).
- С другой стороны, если первичные сцинтилляции в видимом и инфракрасном диапазоне в LAr вызваны $NBrS$, то при добавлении CH_4 в LAr интенсивность излучения может остаться на прежнем уровне, т.к. интенсивность $NBrS$ пропорциональна сечению упругого рассеяния e^- на атоме, которое в широком диапазоне энергий мало отличается для Ar и CH_4 .

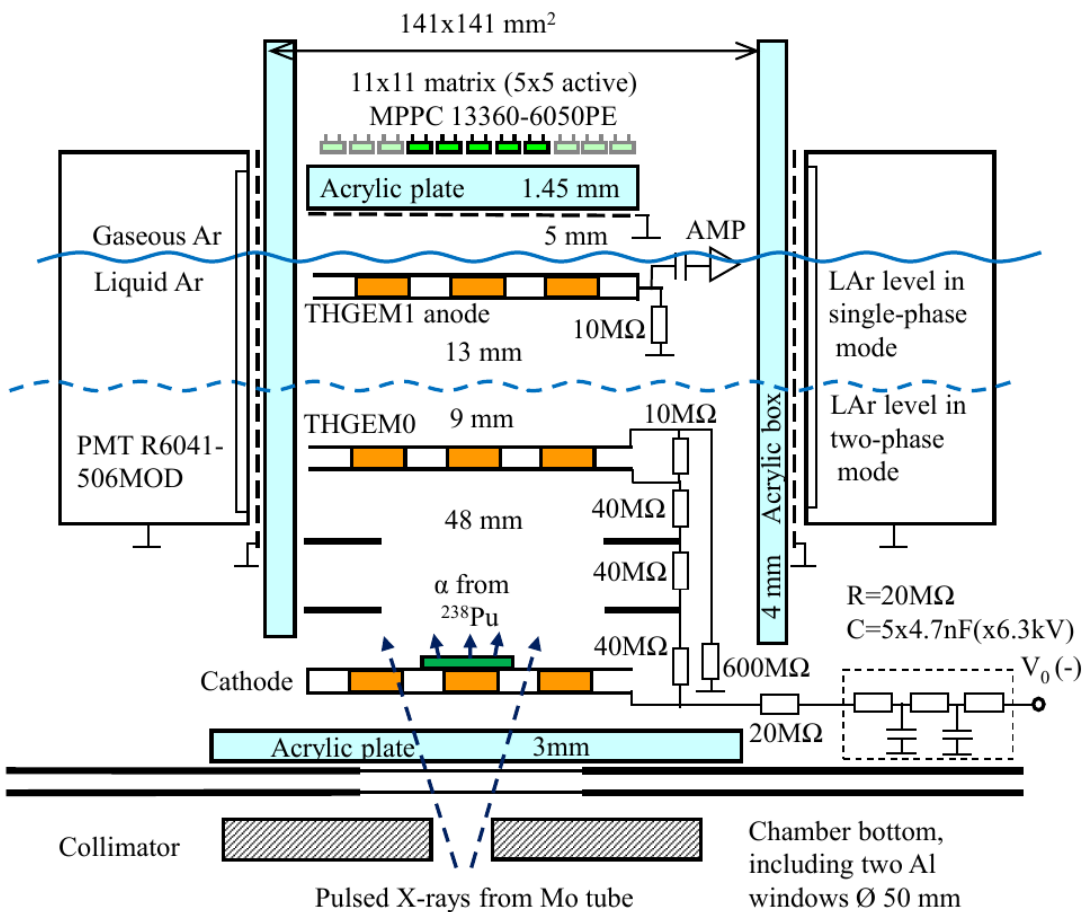
Экспериментальная установка

Экспериментальная установка

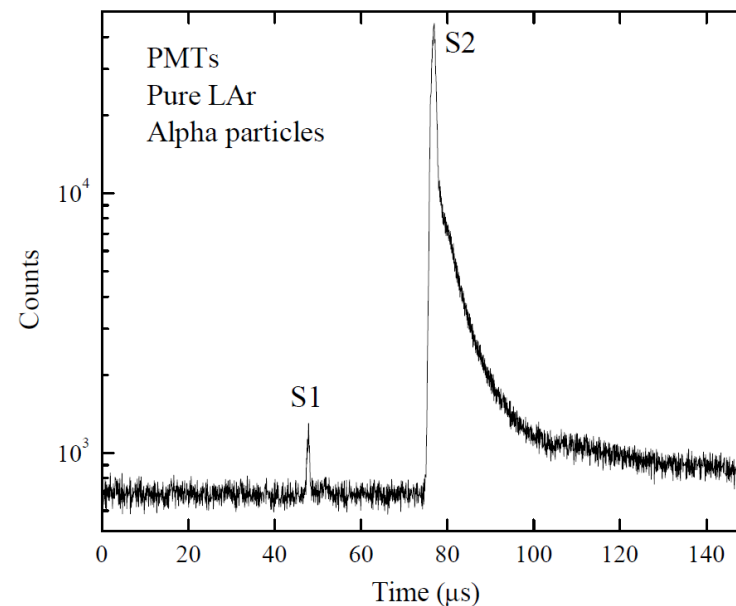


- Установка представляет детектор, работающий в однофазном (жидкость) или двухфазном (жидкость-газ) режиме при давлении 1.00 ат.
- В нижней части детектора расположен дрейфовый промежуток с низким эл. полем (48 мм), в верхней части расположена область высокого эл. поля (22 мм).
- Промежутки сформированы при помощи THGEM (ТГЭУ). Промежуток с низким полем сформирован катодом, двумя полеформ. электродами и THGEM0. Промежуток с высоким полем сформирован THGEM0 и THGEM1.
- Нижняя часть детектора облучалась импульсной рентгеновской трубкой (со средней энергией X-rays 25 кэВ) или альфа частицами с энергией 5.5 МэВ от источника ²³⁸Pu.
- При регистрации частиц записывался как зарядовый сигнал, собираемый на THGEM1, так и световой сигнал, собираемый на PMTs и SiPM матрицу.

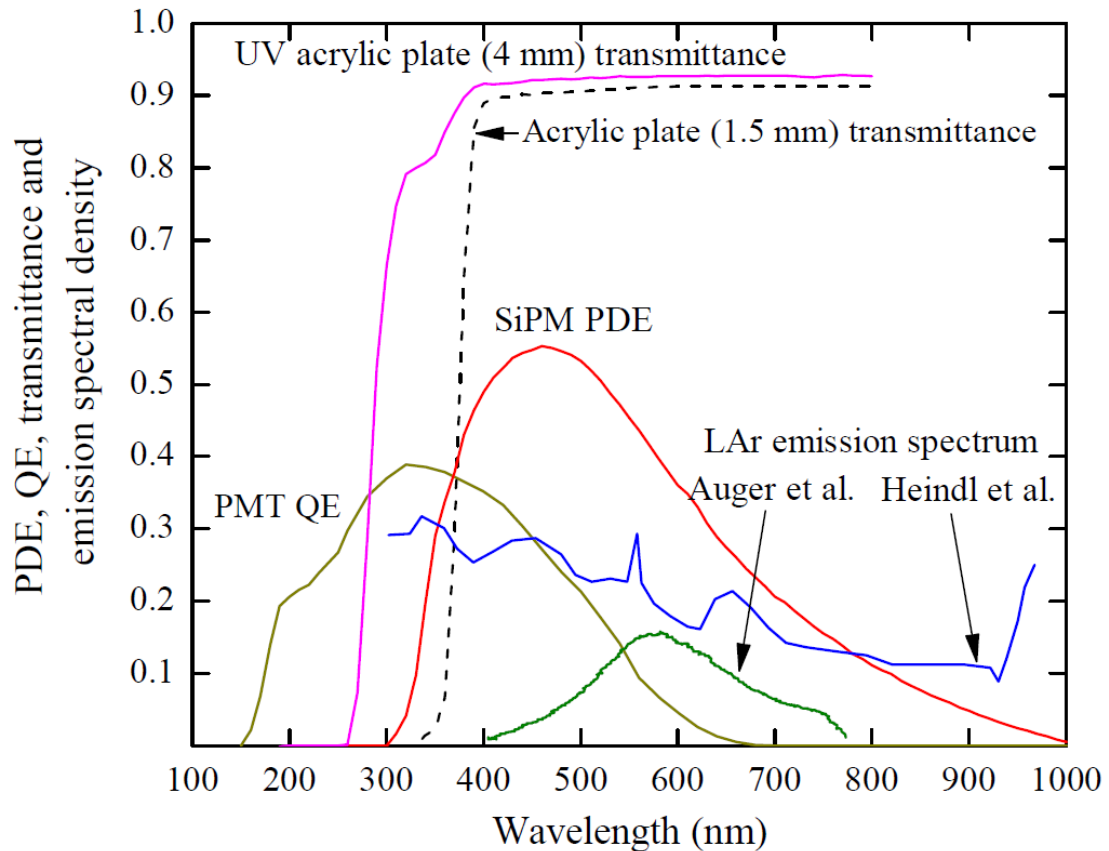
Экспериментальная установка



- SiPM матрица (25 каналов) была расположена в верхней части детектора, а 4 PMT - по периметру области высокого поля. Перед PMTs и SiPM матрицей для защиты от высокого поля добавлены акриловые пластины толщиной 4 и 1.5 мм соответственно.
- При регистрации X-rays запуск производился от генератора рентгеновской трубки, поэтому использовался однофазный режим.
- При регистрации альфа частиц запуск производился по сигналу вторичной сцинтилляции в газе, поэтому было необходимо использовать двухфазный режим.

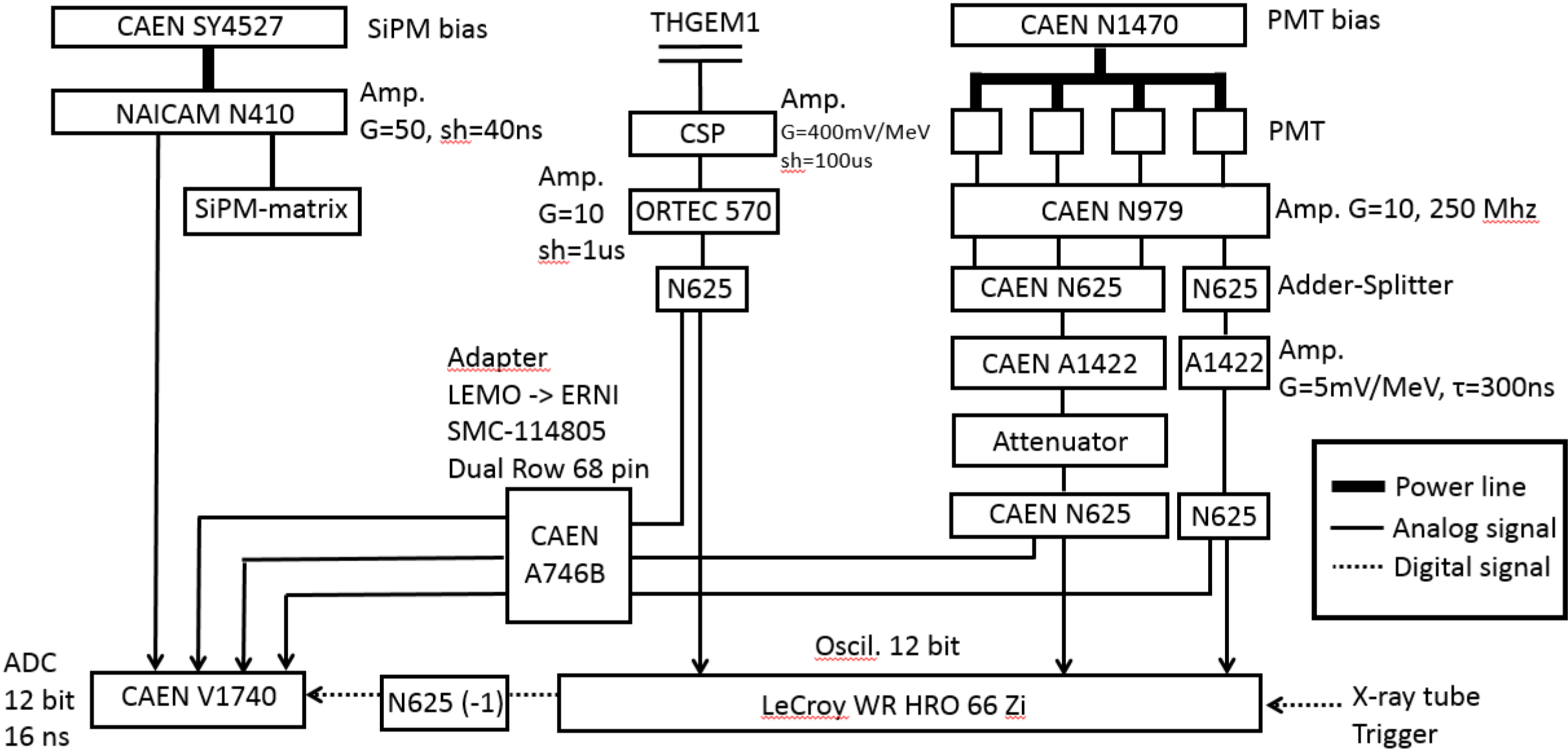


Экспериментальная установка

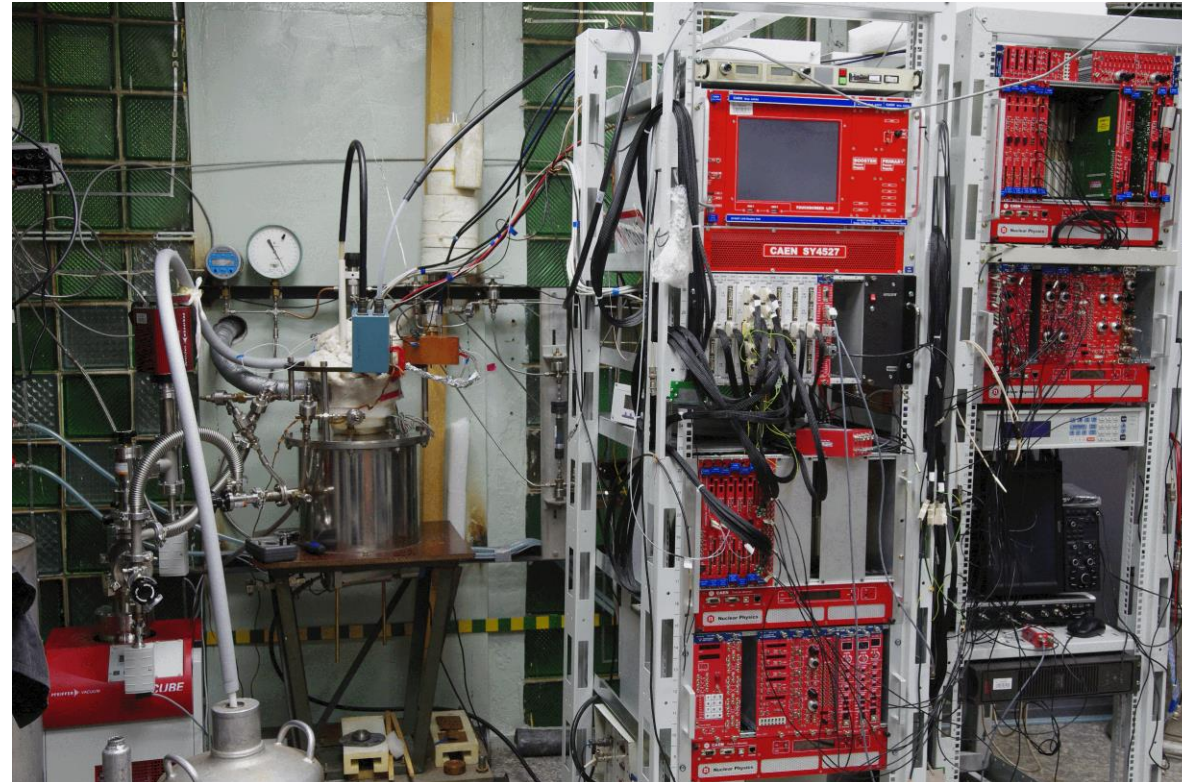
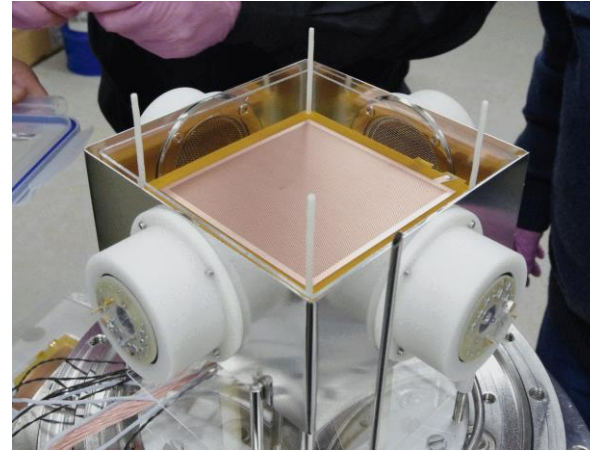
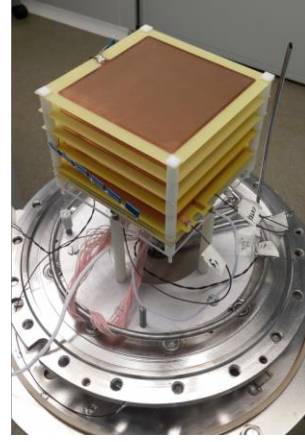
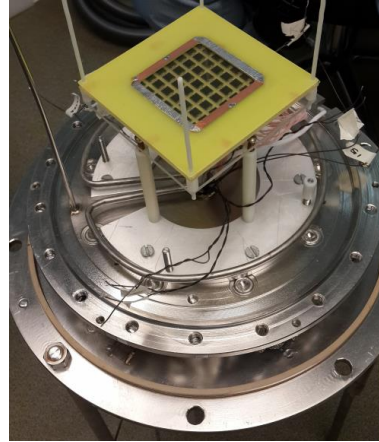
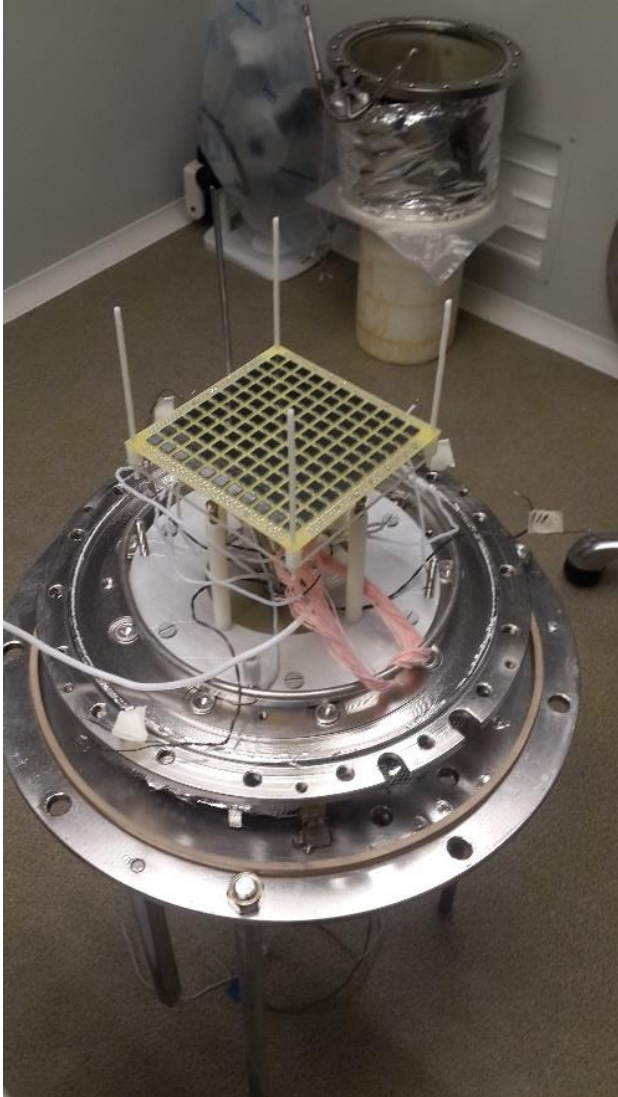


- На рис. представлены спектры прозрачности акрила, спектры эффективности PMTs и SiPMs, а также спектры излучения, полученные в работах Auger et al. и Heindl et al. С учетом прозрачности акриловых пластин, PMTs и SiPMs были чувствительны к излучению в диапазоне 250-700 и 350-1000 нм соответственно.
- В эксперименте изучался световой выход LAr и смеси LAr+CH₄ при концентрациях CH₄ до 10%. Для приготовления смеси использовались Ar (99.9998%) и CH₄ (99.95%). Смесь готовилась вне установки, путем охлаждения баллона с газом и добавления необходимого количества Ar или CH₄.
- Концентрация CH₄ контролировалась при помощи анализатора остаточных газов до и после измерений в детекторе.

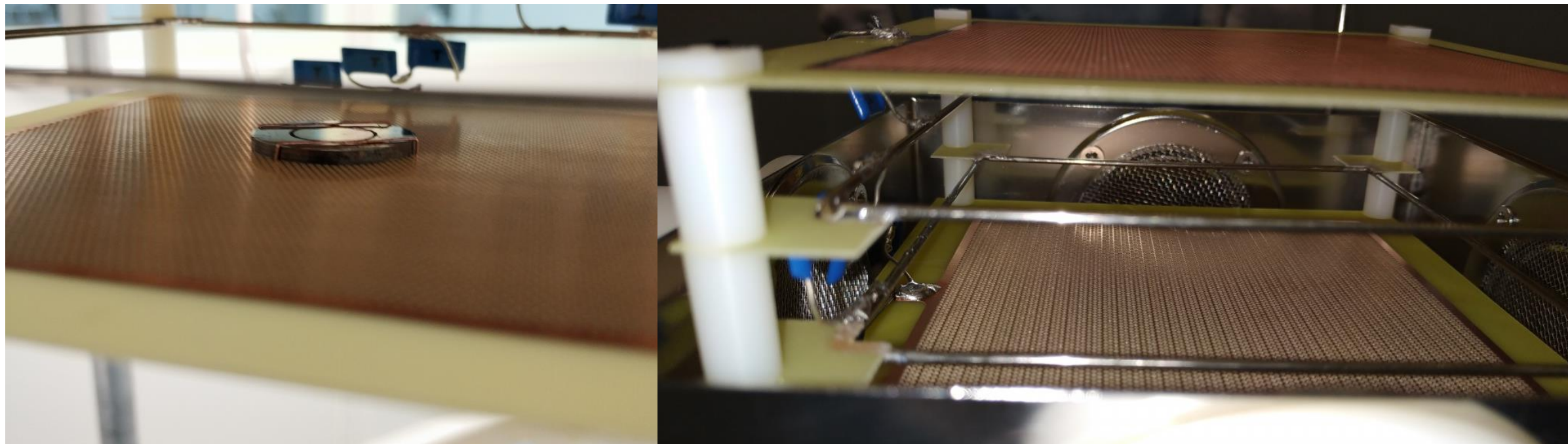
Система сбора данных



Экспериментальная установка

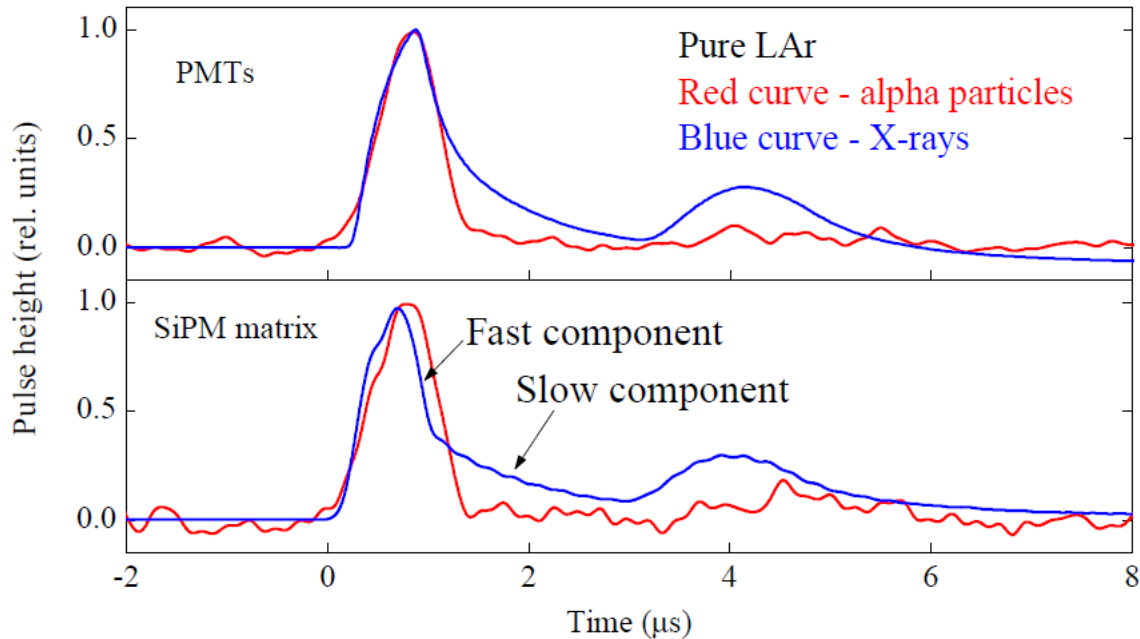


Экспериментальная установка



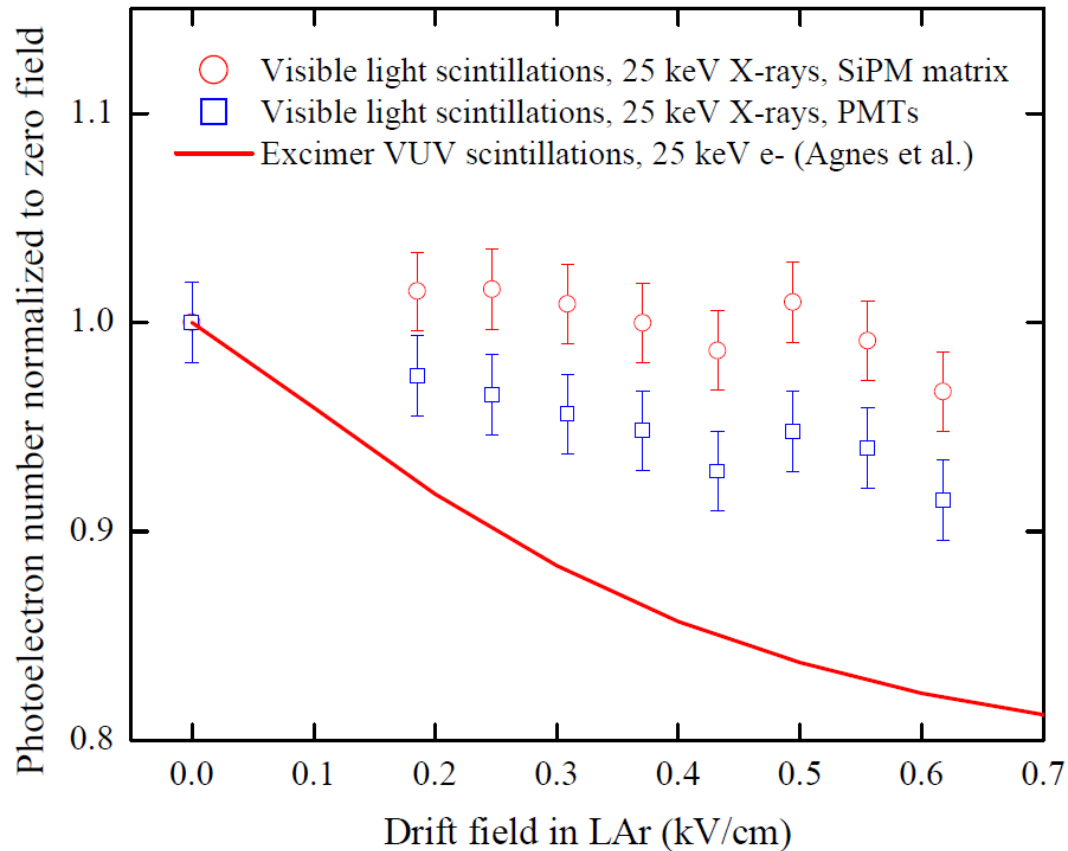
Изучение первичных сцинтилляций в LAr в видимом диапазоне

Анализ формы сигнала



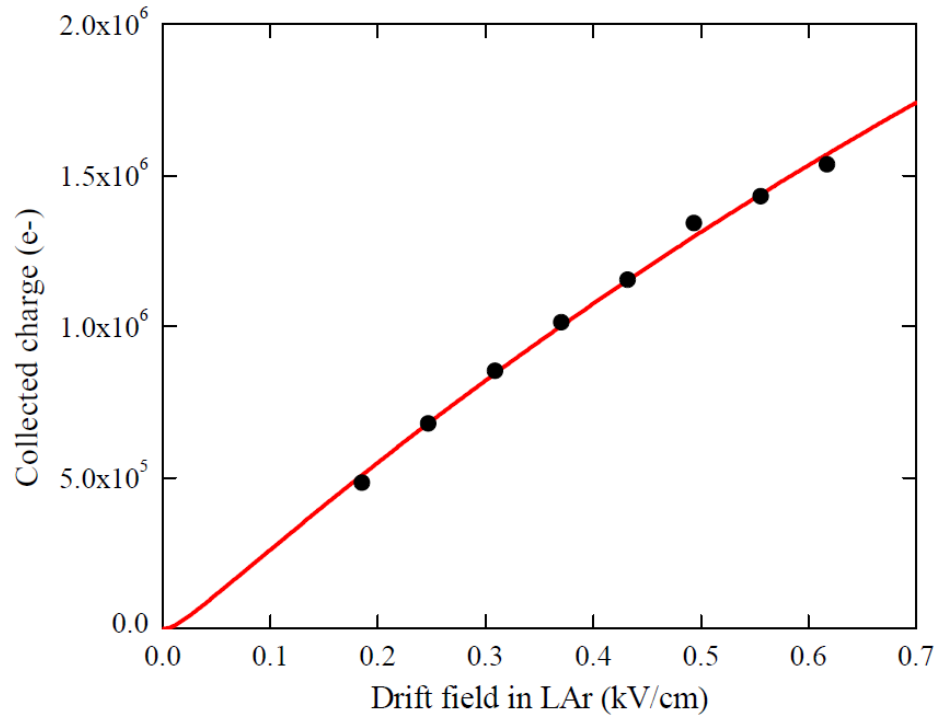
- Анализ формы сигнала может дать ценную информацию о механизмах первичной сцинтилляции.
- При облучении чистого LAr X-rays сигнал состоит из двух пиков, что вызвано свойствами рентгеновской трубки. Первый пик состоит из быстрой (< 300 нс) и медленной (~ 1 мкс) компонент с сопоставимой интенсивностью, что объясняется свойствами излучения (поясняется далее).
- В случае измерений с альфа частицами сигнал состоит только из одного пика.
- Исходя из этой информации можно сделать вывод, что детектор не регистрирует переизлученный ВУФ, т.к. в этом случае и для X-rays и для альфа частиц присутствовала бы медленная компонента ~ 1.6 мкс.
- Далее для изучения световых выходов будем рассматривать число фотоэлектронов в окне длиной 10 мкс.

Зависимость от эл. поля



- На рис. представлена зависимость числа ФЭ от дрейфового поля, нормированная на число ФЭ при нулевом поле при облучении LAr рентгеновской трубкой.
- При увеличении поля световыход снижается: в меньшей степени для SiPMs и в большей для PMTs. В обоих случаях экспериментальные данные значительно выше кривой, предсказывающей снижение световыхода для излучения в ВУФ.
- Таким образом, мы наблюдаем сцинтилляции в видимом и инфракрасном диапазоне без вклада от переизлученного ВУФ.

Энерговыделение



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

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

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

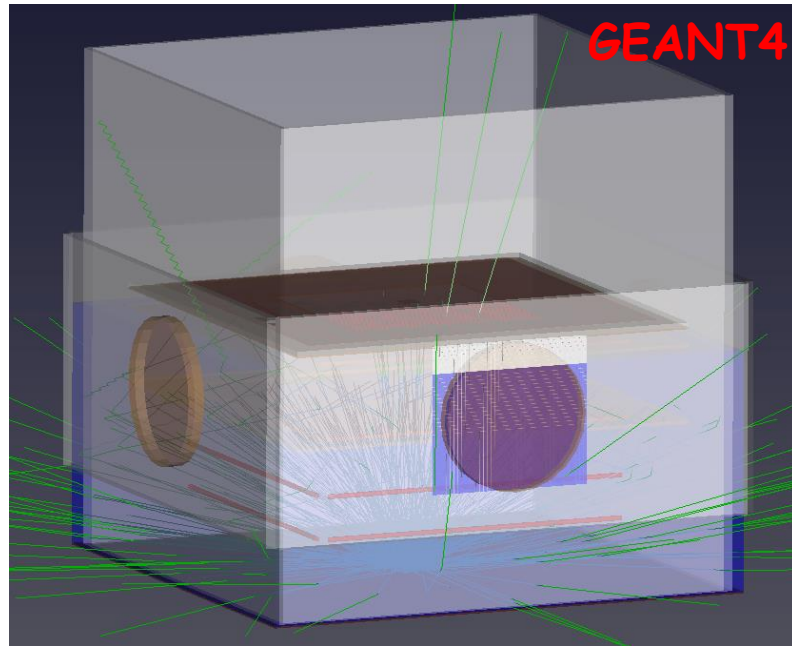
$$K_{att} = 0.95/F^{0.8}$$

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

- Кол-во регистрируемых ФЭ зависит как от количества первичных частиц (X-rays или альфа-частиц), так и от их энергии, поэтому число фотоэлектронов удобно нормировать на выделенную энергию.
- В измерениях с альфа частицами регистрируется одна частица на триггер, поэтому энергия (5.5 МэВ) хорошо определена.
- В измерениях с X-rays регистрируется большое кол-во частиц на триггер. Энерговыделение (E_{dep}) находится через первичный ионизационный заряд, который, в свою очередь, пропорционален собранному заряду.
- Аппроксимируя зависимость заряда, собранного на ТГЭУ1 (анод), от дрейфового поля, был получен первичный ионизационный заряд и вычислено $E_{dep} = 186 \text{ МэВ}$ (7500 X-rays с $\langle E \rangle = 25 \text{ кэВ}$).

Абсолютный световыход

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



Source	Spectral device	Light yield (photon/MeV)	
		Auger et al.	Heind et al.
25 keV X-rays	PMTs	121 ± 24	71 ± 14
	SiPM matrix	187 ± 37	212 ± 42
5.5 MeV α	PMTs	107 ± 22	43 ± 9
	SiPM matrix	87 ± 17	98 ± 20

- Абсолютный световыход определяется как отношение числа ФЭ (N_{PE}) к энергосодержанию (E_{dep}) и эффективности конверсии фотона в фотоэлектрон (PCE).
- PCE вычисляется в GEANT4, где учтены квантовые эффективности SiPMs и PMTs, 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 (PMTs/SiPMs) и предполагаемых спектров излучения (Auger et al./Heindl et al.) в диапазоне 400-1000 нм.
- Использовали данные с SiPM матрицы, т.к. световыход лучше согласуется для разных спектров излучения, меньше зависимость от эл. поля. и лучше определяется число ФЭ,
- Итого: 200±50 фот./МэВ (X-rays), 92±23 фот./МэВ (альфа частицы).

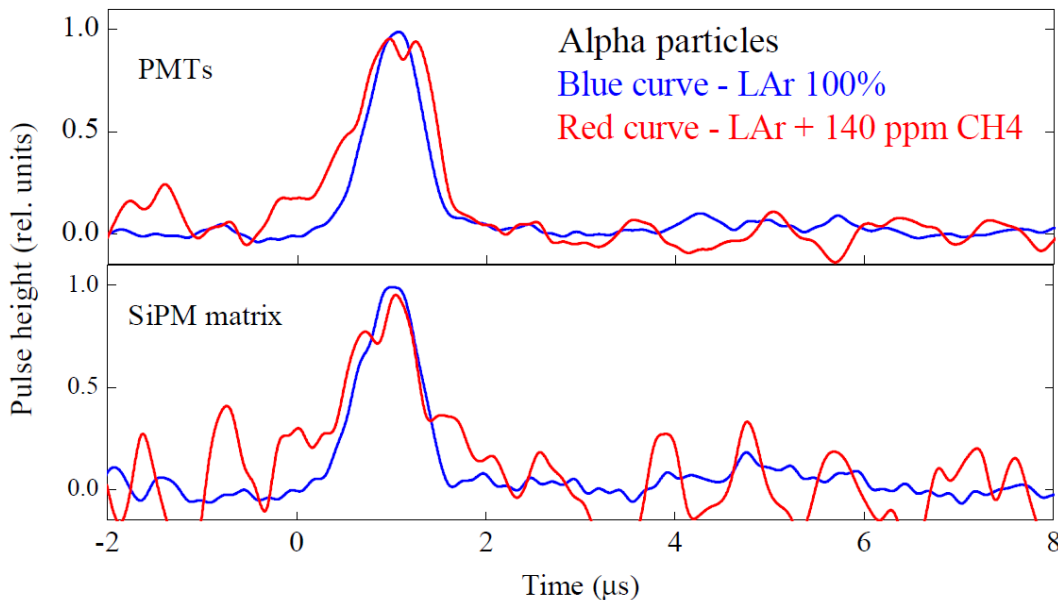
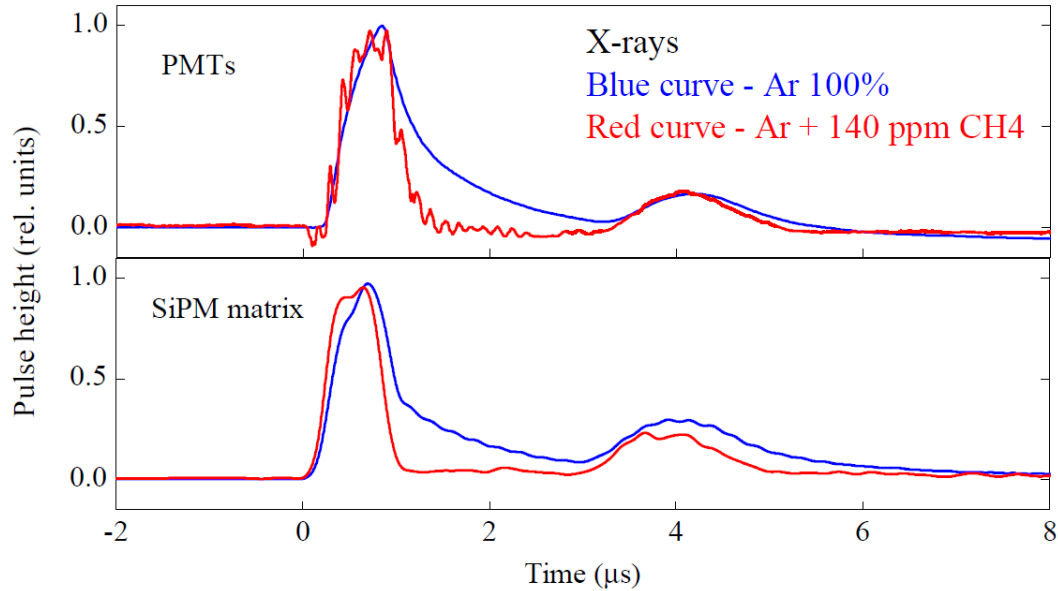
Сравнение с другими работами

Cite	Source	Drift field (kV/cm)	Recorded spect. (nm)	Light yield in pure LAr (photon/MeV)	Time constants
Heindl et al. [14]	12 keV e ⁻	0	110-1000	Observed	-
Bondar et al. [15]	25 keV X-rays	0-30	400-1000	510 ± 90 no field depen.	-
Neumeier et al. [20, 21]	12 keV e ⁻	0	500-3500	Not observed	-
Alexander et al. [16]	511 keV γ-rays	0	715-900	Observed	$\tau_f < 300$ ns $\tau_s \approx 2 - 4$ μs
Auger et al. [17]	Breakdown 56 kV, 3 mm	≤187	400-800	Observed	-
This work	25 keV X-rays	0-0.62	350-1000	200 ± 50 no field depen.	$\tau_f < 300$ ns $\tau_s = 1 \pm 0.3$ μs
Jones et al. [19]	5.3 MeV α	0	≈300-650	Not observed (<10 ph./MeV)	-
Escobar et al. [18]	5.4 MeV α	0	715-900	Observed	-
This work	5.5 MeV α	0.3-0.62	350-1000	92 ± 23	$\tau_f < 300$ ns

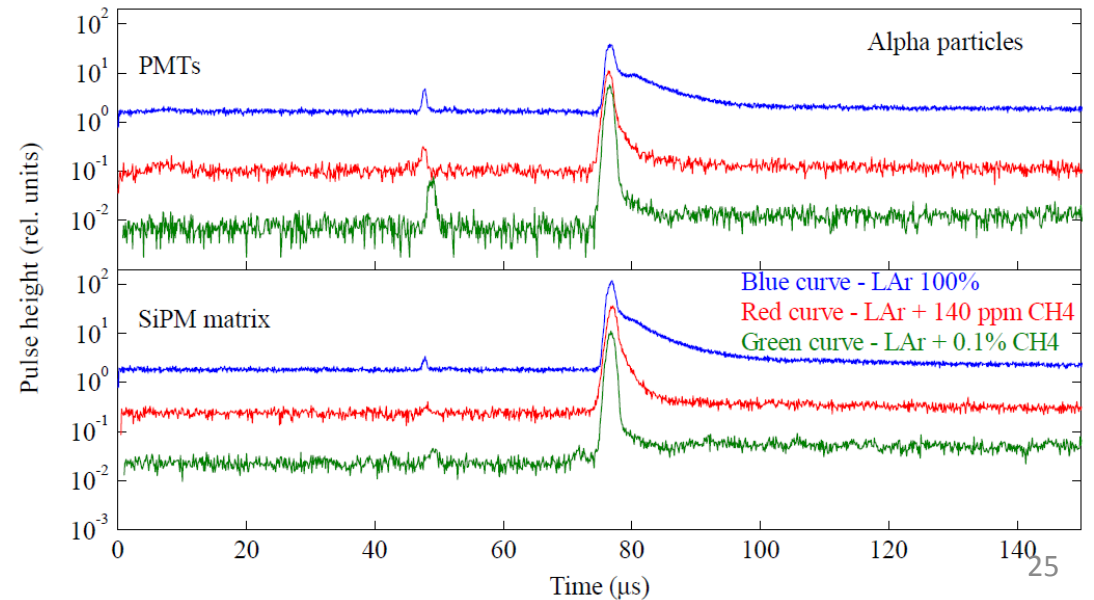
- В таблице представлены все известные на данный момент результаты по первичным сцинтилляциям в чистом LAr в видимом и инфракрасном диапазоне.
- Стоит отметить, что в нашей работе представлен комплексный анализ свойств излучения: проведены измерения для разных источников ионизации (X-rays и альфа частиц)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

Изучение первичных сцинтилляций в LAr+CH₄ в видимом диапазоне

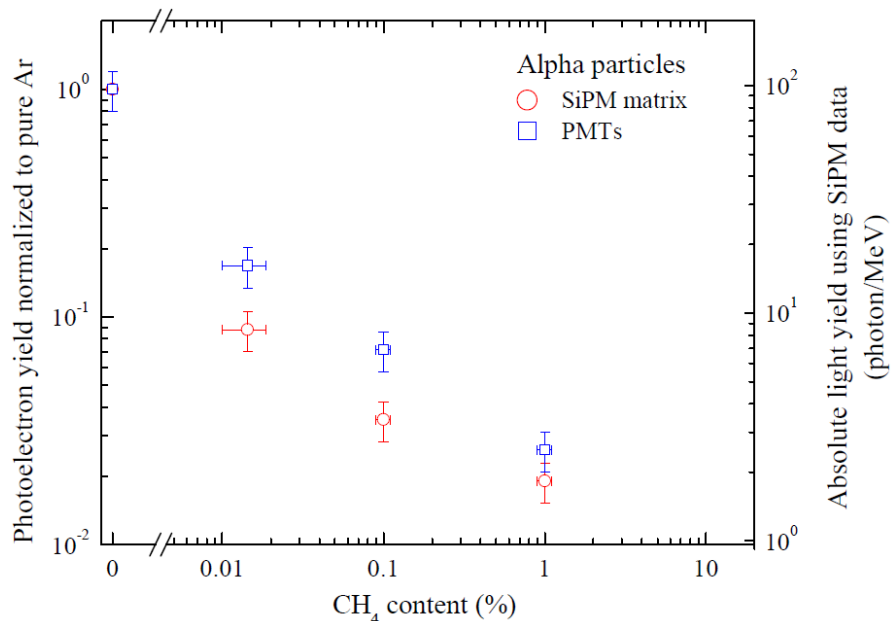
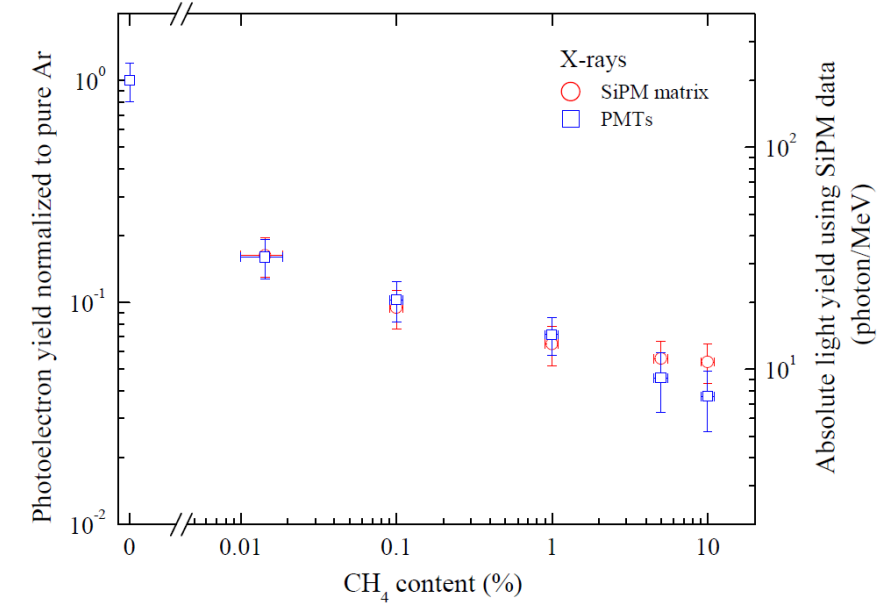
Анализ формы сигнала



- В измерениях с X-rays при увеличении концентрации CH₄ остается лишь быстрая компонента сигнала (<300 нс). Таким образом медленная компонента сигнала в чистом LAr была вызвана свойствами излучения, а не свойствами рентгеновской трубки.
- В измерениях с альфа частицами при увеличении концентрации CH₄ принципиальных изменений в форме сигнала не происходит. Наблюдаемое уширение сигнала вызвано дрожанием триггера, т.к. с ростом концентрации CH₄ падает сигнал S2.

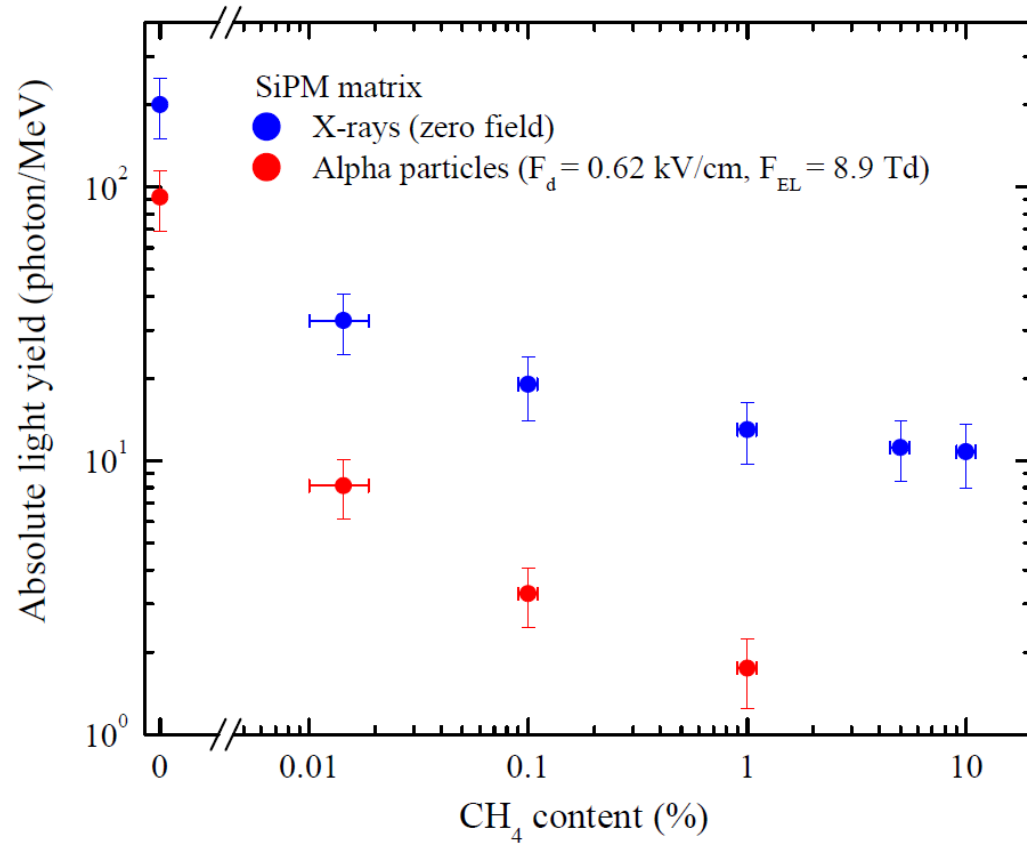


Изменение световыхода при добавлении CH_4



- На рисунках представлено число ФЭ от концентрации CH_4 , нормированное на число ФЭ в чистом LAr (относительный фотоэлектронный выход).
- При измерениях с X-rays относительные фотоэлектронные выходы для PMTs и SiPM матрицы почти совпадают. Т.к. PMTs и SiPM матрица чувствительны в разных спектральных диапазонах, то это что может указывать на малое изменение спектра излучения при добавлении CH_4 в LAr.
- При измерениях с альфа частицами относительные фотоэлектронные выходы для PMTs и SiPM матрицы заметно отличаются ($\sim 2-3 \sigma$).

Абсолютный световыход

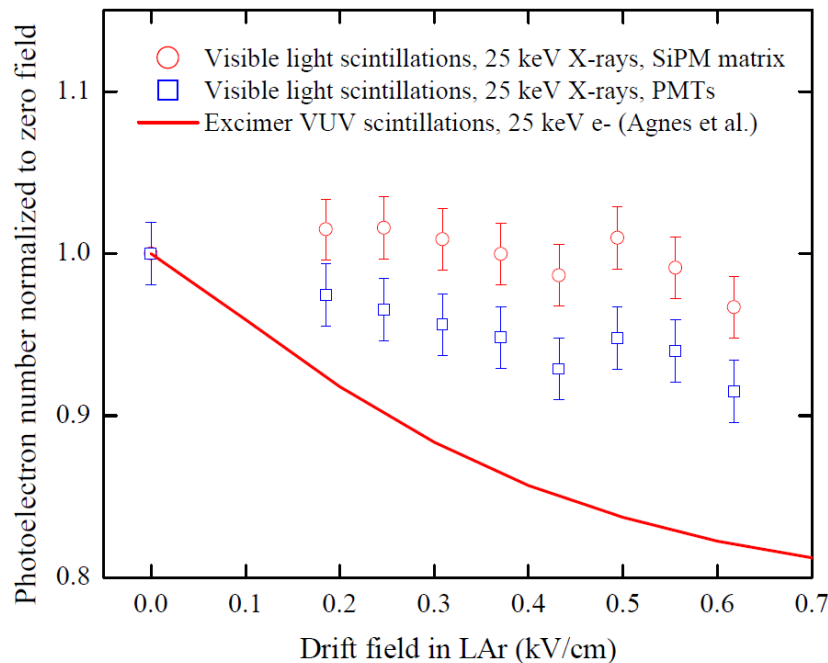
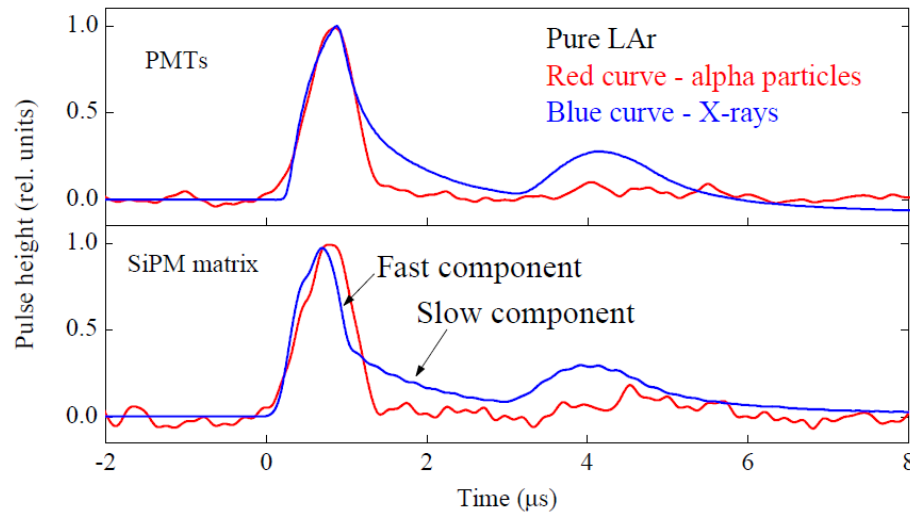


- Используя значение абсолютного световыхода в чистом LAr и зависимость относительного фотоэлектронного выхода от концентрации CH_4 , был найден абсолютный световыход в LAr+ CH_4 .
- Предполагалось, что спектр излучения не меняется при добавлении CH_4 в LAr: найти в литературе спектр излучения L CH_4 , а тем более LAr+ CH_4 , не удалось.

Liquid mixture	Yield in 400-1000 nm (photon/MeV)	
	Pulsed X-rays (zero field)	Alpha particles ($F_d = 0.62$ kV/cm)
LAr 100%	200±50	92±23
LAr + 140 ppm CH_4	32±8	8.2±2.0
LAr + 0.1% CH_4	19±5	3.3±0.8
LAr + 1% CH_4	13.0±3.3	1.8±0.5
LAr + 5% CH_4	11.3±2.8	-
LAr + 10% CH_4	11.1±2.8	-

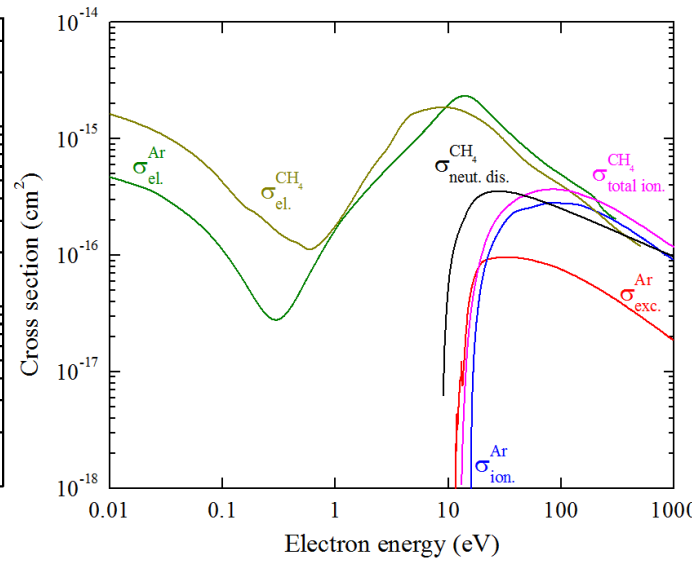
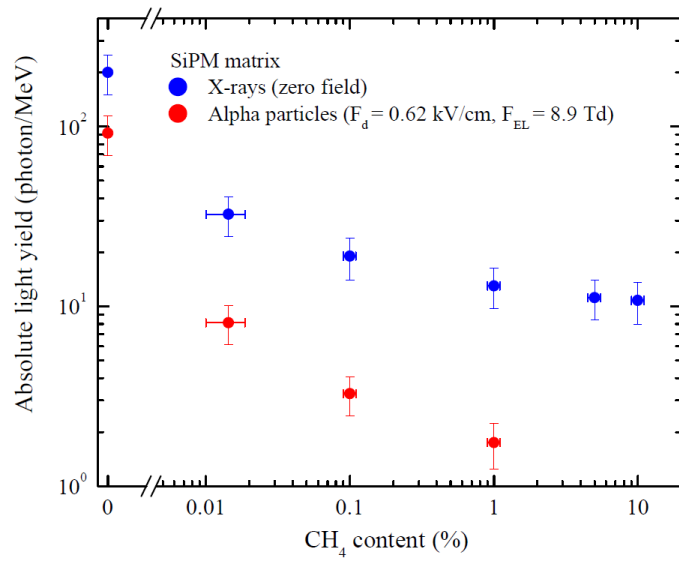
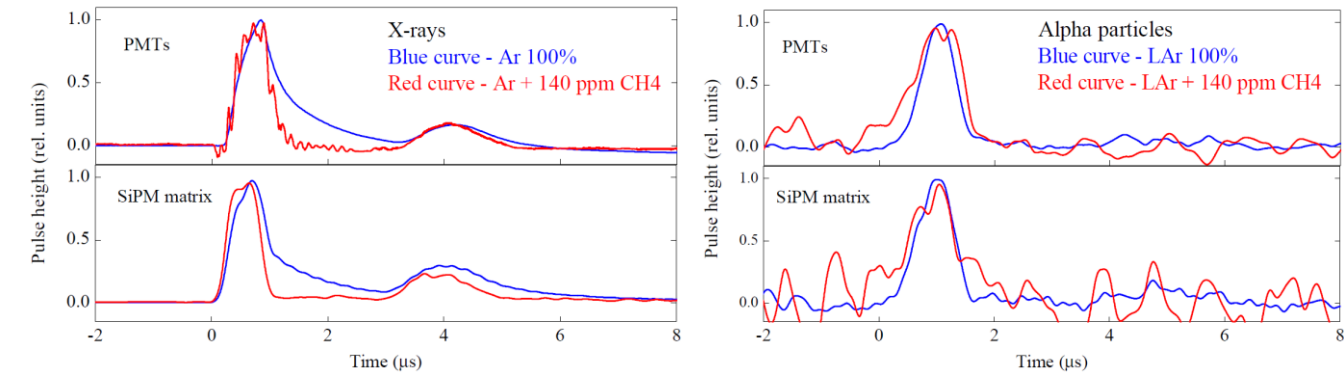
Обсуждение результатов и компиляция данных по влиянию добавки CH_4 в LAr

Чистый LAr



- X-rays: 200 фот./МэВ, не зависит от эл. поля, сигнал имеет две компоненты (<300 нс, ~ 1 мкс) с сопоставимым вкладом.
- Альфа частицы: 92 фот./МэВ, имеется только быстрая компонента (<300 нс).
- Поскольку световыход от X-rays не зависит от эл. поля и отсутствует медленная компонента сигнала от альфа частиц, то данные сцинтилляции не связаны с эксимерным механизмом, где присутствует компонента 1.6 мкс. Перечисленные свойства излучения характерны для NBrS, которое достаточно быстрое и, согласно оценкам, не зависит от столь низкого эл. поля.
- Однако наличие медленной компоненты сигнала от X-rays не позволяет объяснить все наблюдаемые эффекты NBrS. Возможно, имеется дополнительный механизм излучения.
- Разная временная структура для альфа частиц и X-rays может быть использована для эффективного подавления фона, но пока световыход в видимом и инфракрасном диапазоне слишком низкий для практического применения в детекторах темной материи.

LAr+CH4



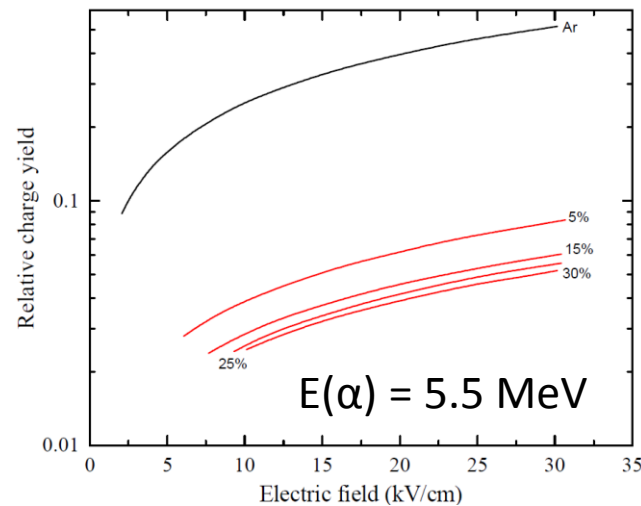
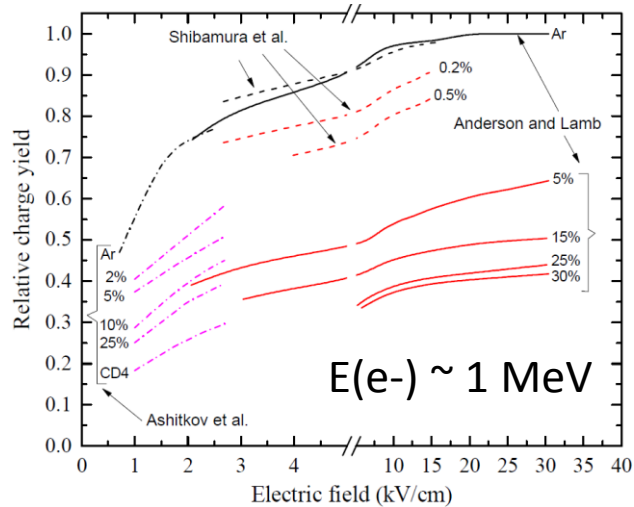
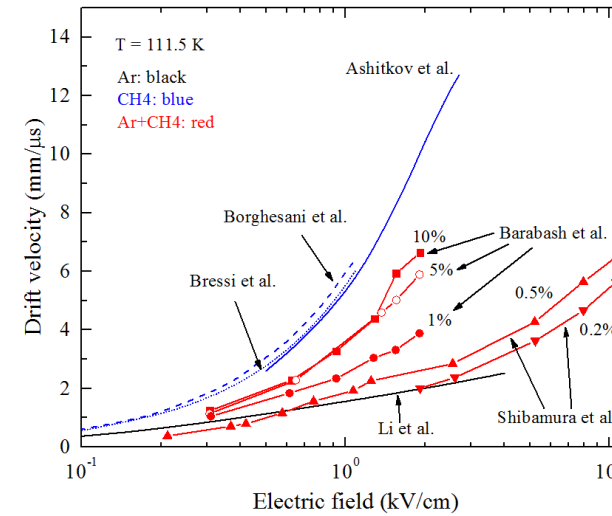
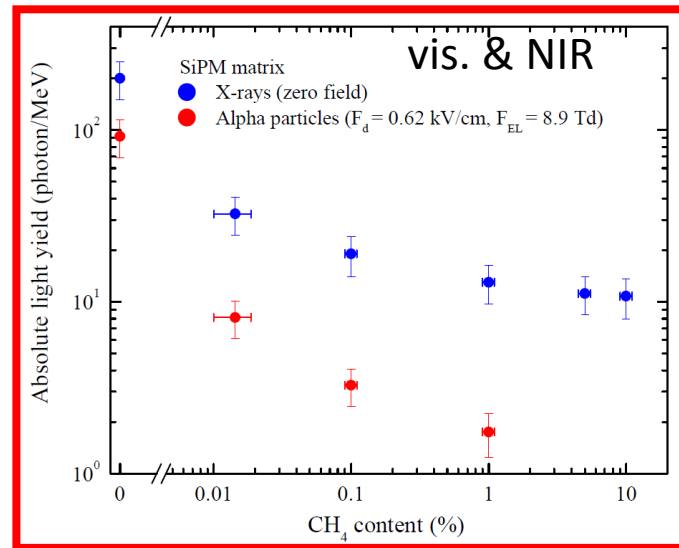
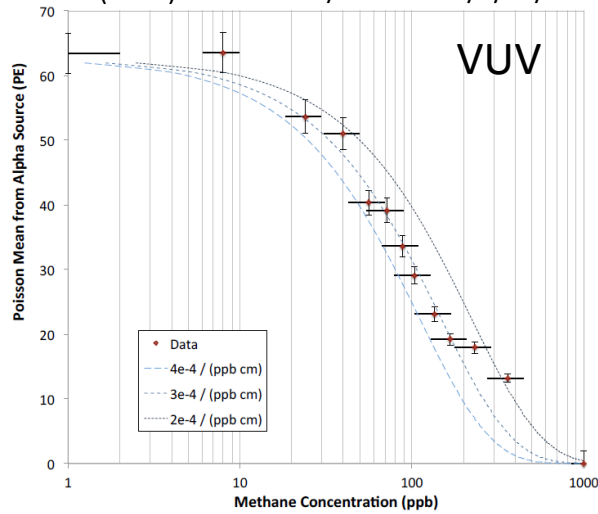
- В измерениях с X-rays и альфа частицами наблюдается только быстрая компонента, что характерно для NBrS.
- При добавлении CH₄ происходит резкое падение световыхода, хотя для NBrS ожидалось сохранение интенсивности на прежнем уровне.
- Возможное объяснение: энергия дельта электронов тратится на диссоциацию и ионизацию молекул CH₄, поэтому меньше энергии уходит на тормозное излучение.
- В планах смоделировать первичные сцинтилляции в LAr и LAr+CH₄ от NBrS, однако это довольно сложная задача, т.к. процесс нестационарный и сечения рассеяния известны только в газе (Ar, CH₄), а в жидкости они могут отличаться.
- В смеси LAr+1% CH₄ световыход от X-rays (13 фот./МэВ) слишком низкий для практического применения в детекторах нейтронного вето, однако добавка CH₄ может использоваться для компенсации адронного калориметра.

Эффекты от добавки CH₄ в LAr

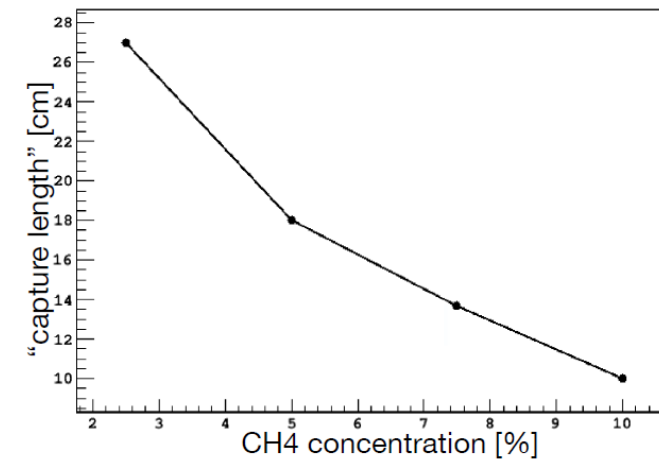
"_"

"_+"

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



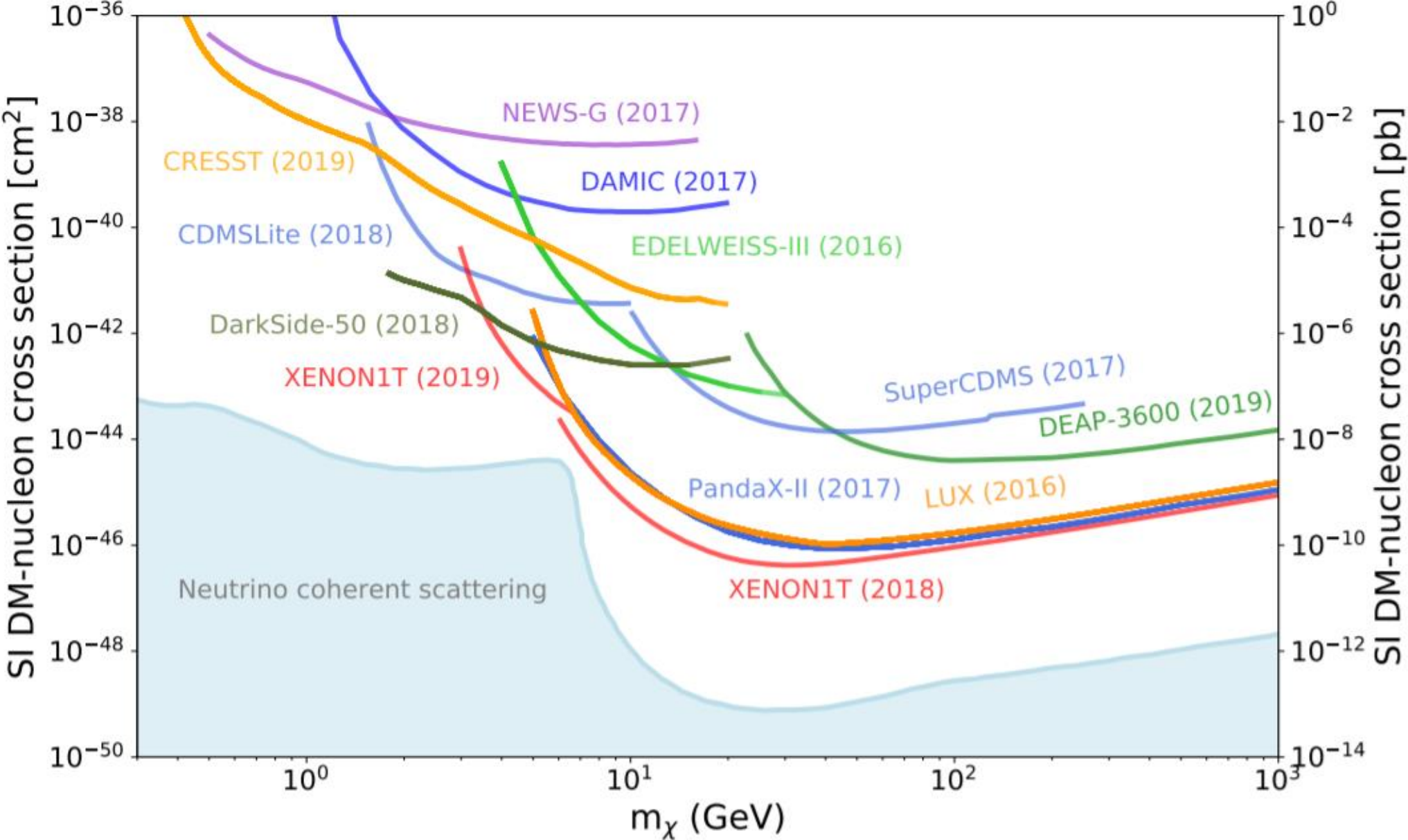
from DarkSide internal discussion



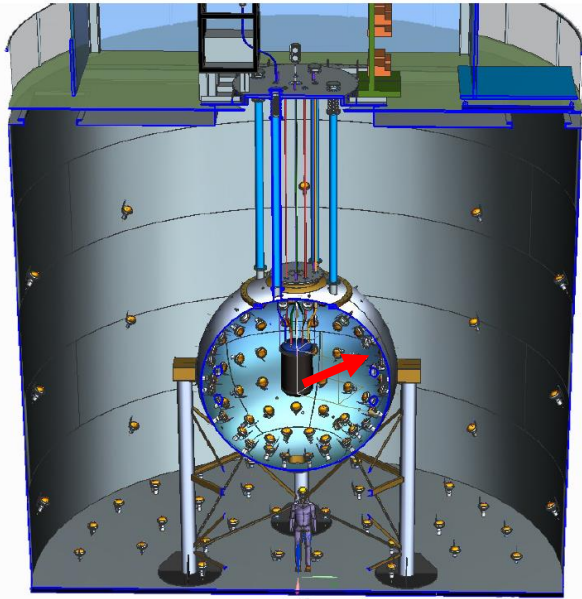
Выводы и заключение

- Впервые систематически изучены первичные сцинтилляции в чистом LAr и LAr+CH₄ в видимом и инфракрасном диапазоне.
- Был оценен абсолютный световыход первичных сцинтилляций (в видимом и инфракрасном диапазоне): в чистом жидком аргоне он составил около 200 и 90 фот./МэВ для X-rays и альфа частиц соответственно. В жидком аргоне с добавкой метана световыход фотонов значительно снизился, более чем на порядок при содержании метана 1%.
- Добавка CH₄ в LAr может быть использована для компенсации адронных калориметров и улучшения их энергетического разрешения.
- Данное исследование приближает нас к пониманию альтернативных (неэксиммерных) механизмов первичных сцинтилляций в видимом диапазоне, что позволит улучшить моделирование процессов, происходящих в двухфазных детекторах темной материи, и, возможно, позволит в будущем отказаться от использования сместителей спектра.

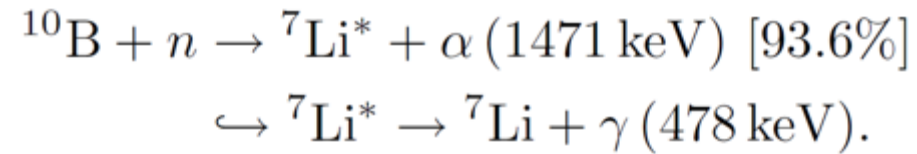
Спасибо за внимание!



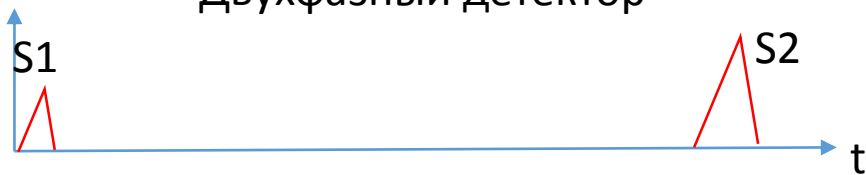
Детектор на жидком сцинтилляторе



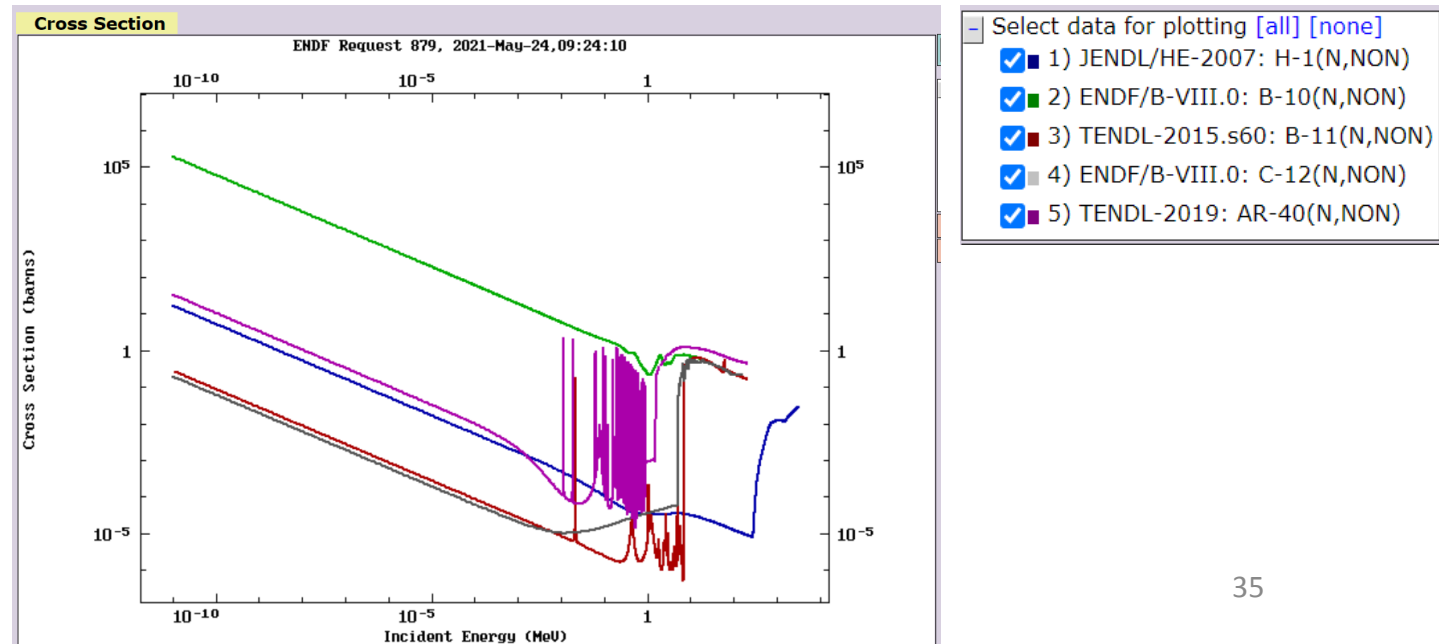
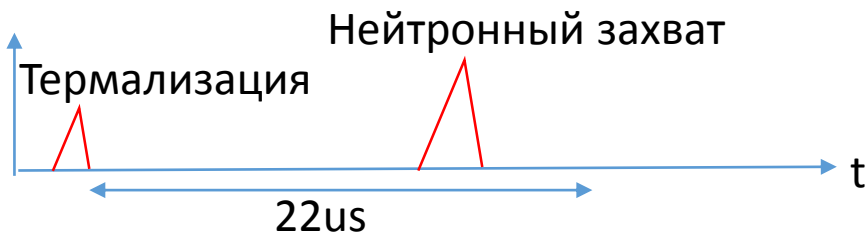
- В детекторе на жидком сцинтилляторе в основном происходит неупругое рассеяние на атомах бора.

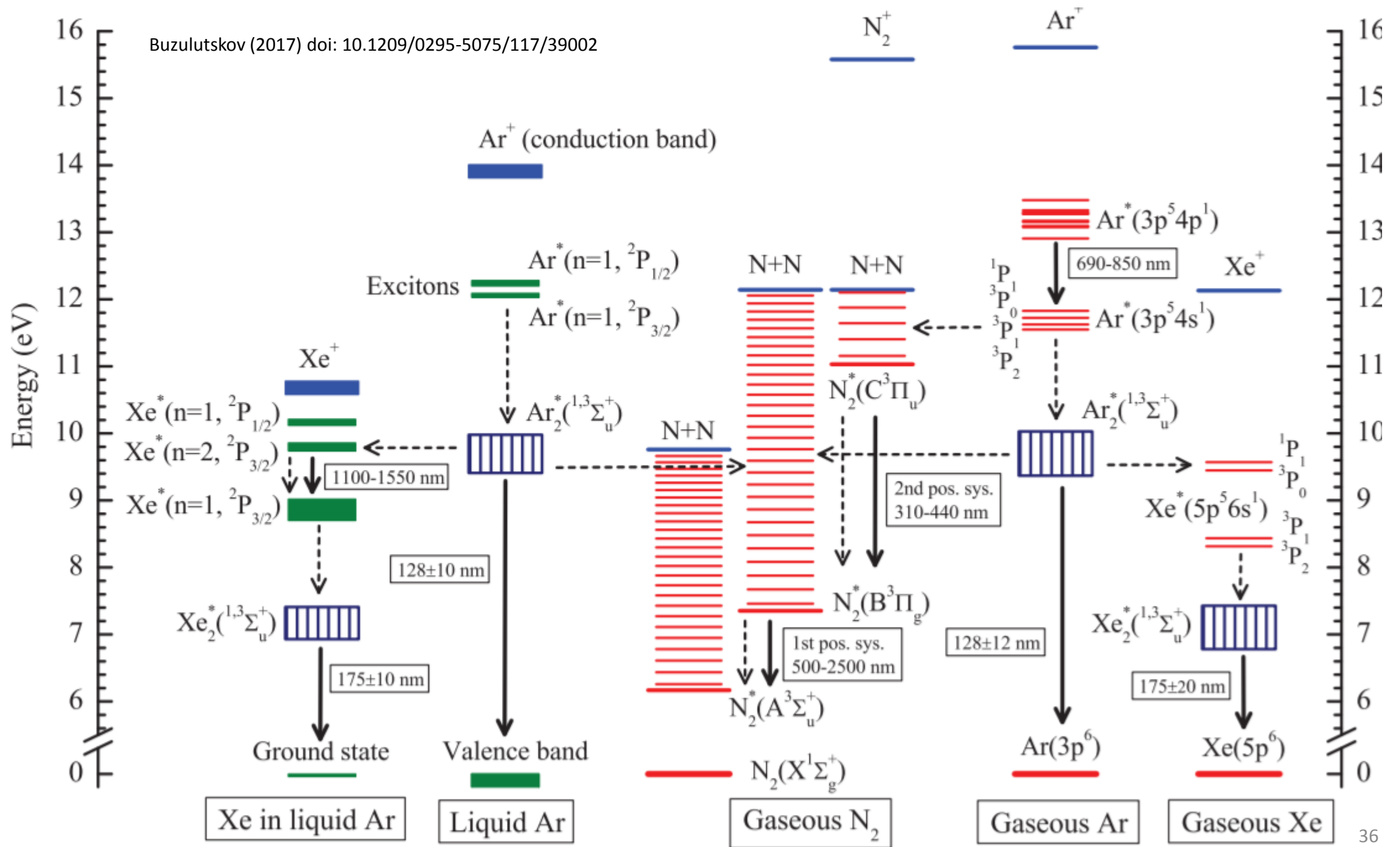


Двухфазный детектор



Детектор на жидком сцинтилляторе





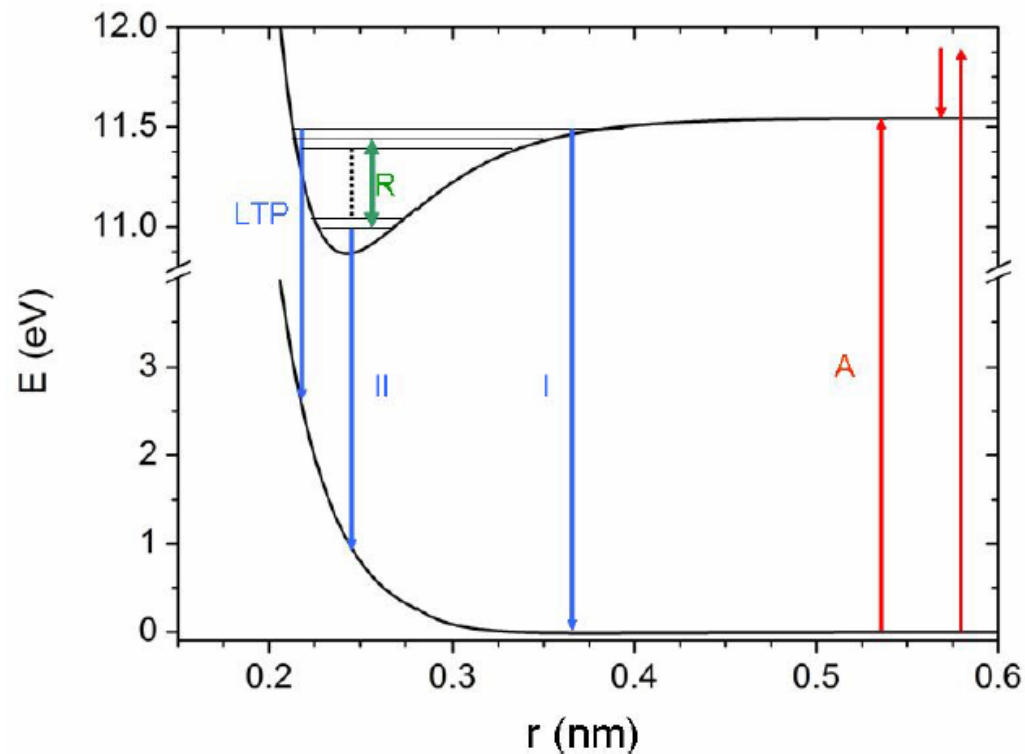


Fig. 2: (Colour on-line) Schematic level diagram of the lowest-lying atomic and molecular states of argon. Transitions from vibrationally relaxed molecules to the repulsive ground state are marked II. These transitions lead to the so-called second excimer continuum of the rare gases. Transitions marked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

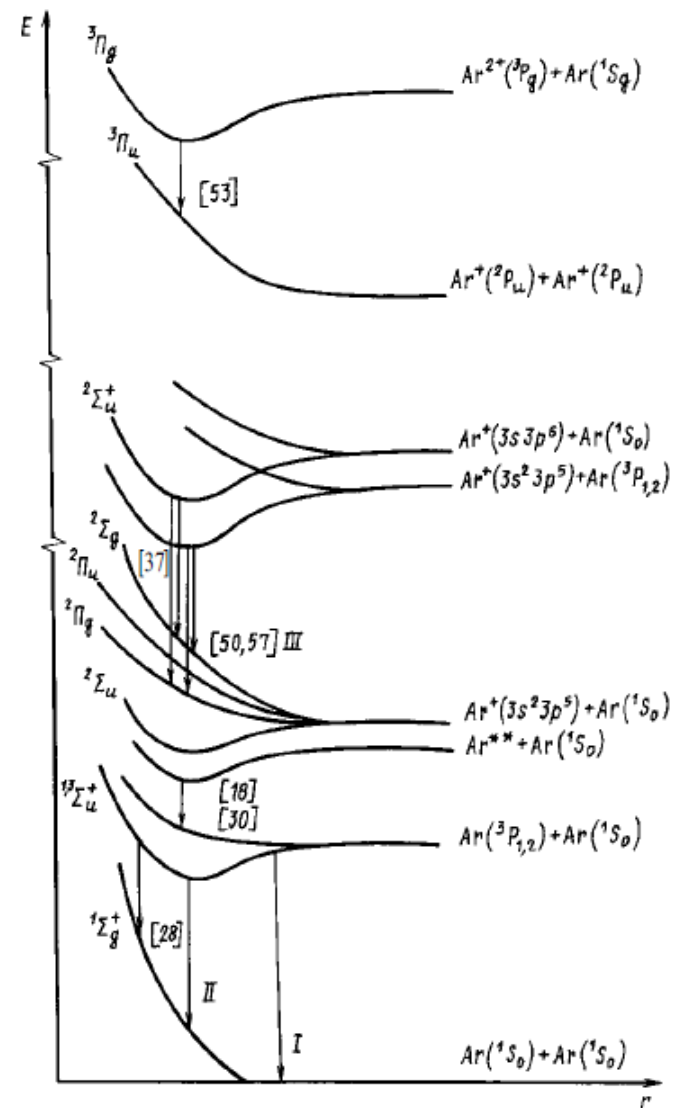


Рис.1. Потенциальные кривые молекул и ионов молекул инертных газов. Стрелками показаны димерные переходы (I, II – соответственно переходы в первый и второй континуумы) и переходы в третий континуум согласно нашей (III) и другим (прочие переходы) точкам зрения.