



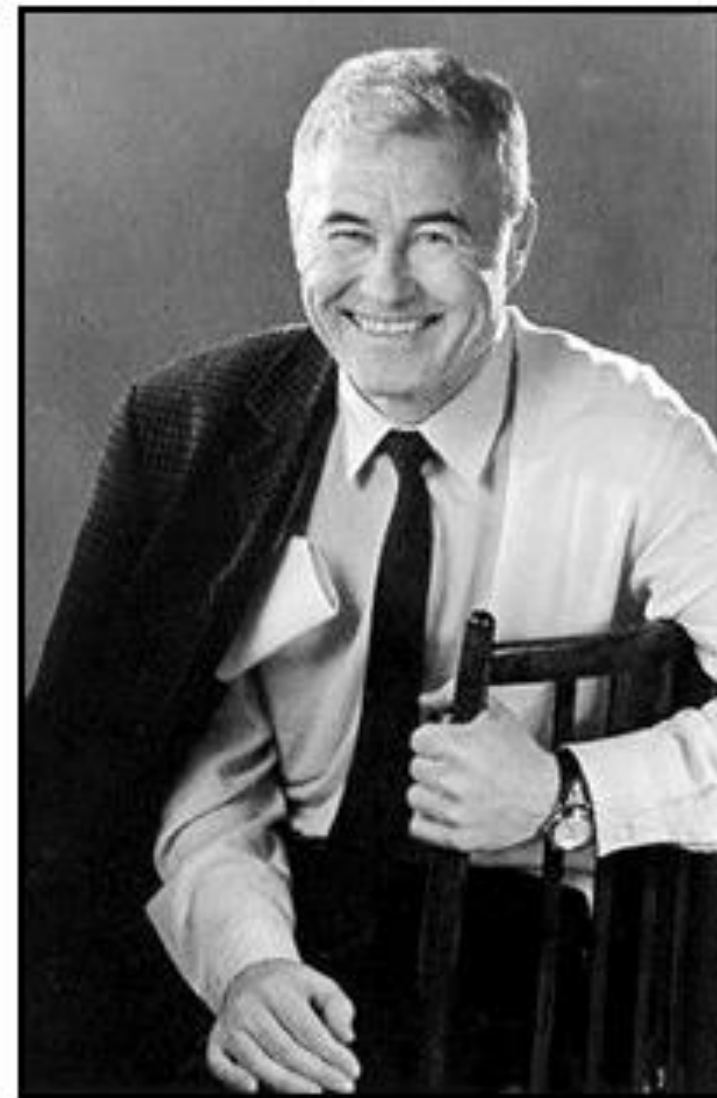
**А.Н. ШАЛЮГИН** **НЭОМАП ЛЯП**

**Исследование характеристик модулей при  
создании жидкоаргонового торцевого  
адронного калориметра установки ATLAS.**

**(по материалам диссертации)**

- 1. Цели и задачи диссертационной работы.**
- 2. НЕС-калориметр.**
- 3. Ионизация в жидком аргоне.**
- 4. Загрязнение кислородом жидкого аргона.**
- 5. Серийное производство.**
- 6. Проверка на тестовом пучке SPS-ускорителя.**
- 7. Радиационная стойкость системы н/в питания.**
- 8. Выводы.**

22/05/2024 Семинар ЛЯП



**Мотиватор**

**В.Н. ПЕРВУШИН**

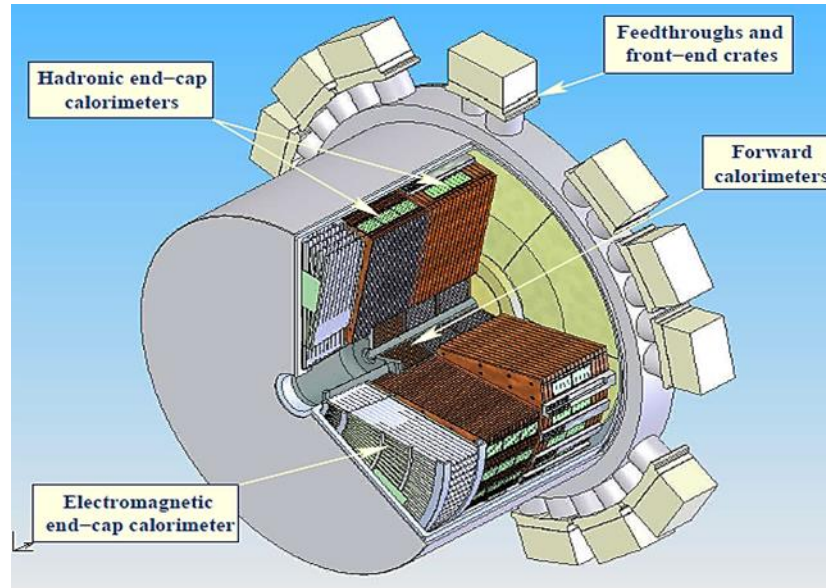
**14.09.1944-10.07.2016**

# 1. Цели и задачи работы

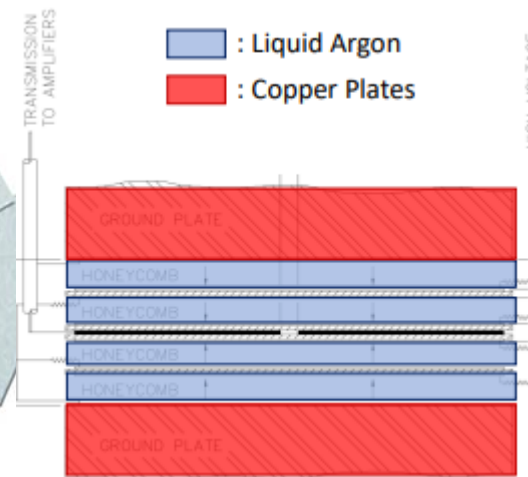
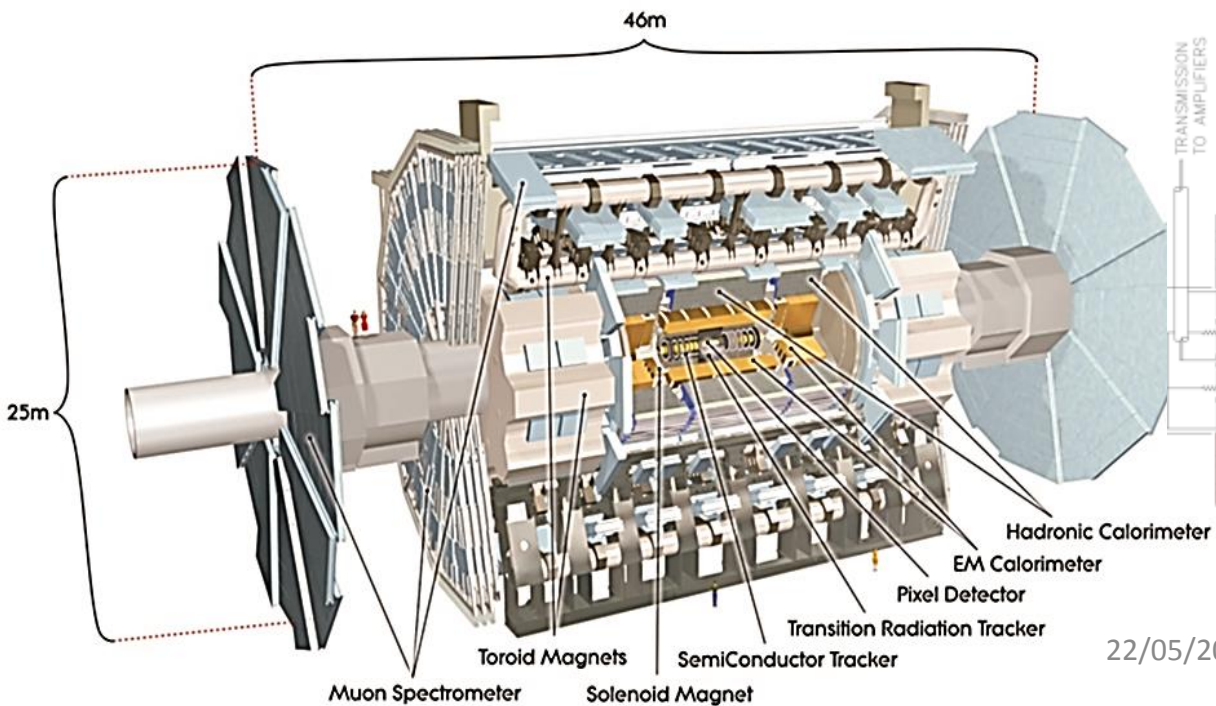
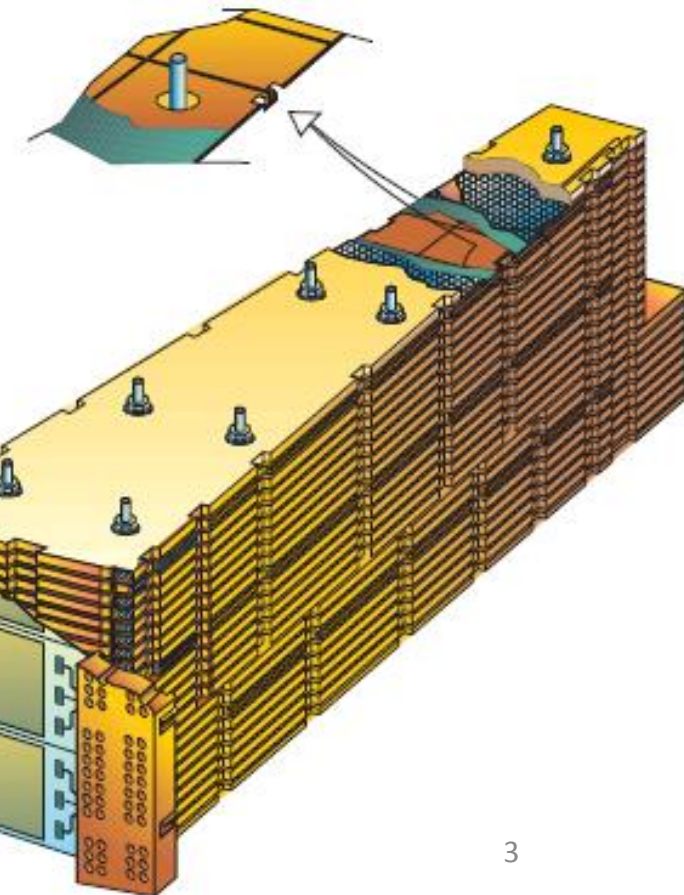
- Протестировать следующие составные элементы НЕС-калориметра с помощью специальных радиационных тестов на этапе подготовки к серийному производству модулей:
  - конструкционные материалы и электронные компоненты на предмет загрязнения кислородом жидкого аргона;
  - переднюю детекторную электронику (GaAs-чипы) при температуре жидкого азота и систему её низковольтного питания при комнатной температуре на предмет радиационной стойкости.
- Провести высоковольтный тест на воздухе и в жидком аргоне в финальной фазе процесса серийного производства модулей НЕС-калориметра.
- Провести выборочную проверку модулей калориметра на тестовом пучке SPS-ускорителя (CERN) с целью получения разрешения на электронах и адронах.

Параметр	Значен.
Вес модуля/плиты HEC1-калориметра	2.1т/90кг
Вес модуля/плиты HEC2-калориметра	2.8т/180кг
Толщина по оси Z HEC1-калориметра (в тепле)	816.5 мм
Толщина по оси Z HEC2-калориметра (в тепле)	961.0 мм
Внешний радиус HEC-калориметра (в тепле)	2090 мм
Ср. просвет между внутр радиусами и трубой FCAL	15 мм
Внешний радиус медных плит HEC (в тепле)	2030 мм
Внутренний радиус HEC-калориметра:	
плиты №№1÷9 (в тепле)	372 мм
все другие плиты (в тепле)	475 мм
Расстояние между медными плитами HEC1 и HEC2	40.5 мм

## 2. HEC-калориметр.



Параметры	HEC1 - передний калориметр	HEC2 - задний калориметр
Количество колёс	2	2
Вес каждого колеса	67 300 кг	89 900 кг
Количество модулей в колесе	32	32
Расстояние между модулями по азимуту (углу φ)	2 мм	2 мм





### 3. Ионизация в жидком аргоне (1/2).

$$1. Q = Q_0 \cdot \underbrace{\frac{\lambda}{d} (1 - e^{-\frac{d}{\lambda}})}_{F_{ATT}} \cdot \frac{E}{E_0} \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \frac{\sqrt{x} dx}{\frac{E}{E_0} \cdot e^x + 1}, \text{ где } E_0 = 798 \left( \frac{\text{кВ}}{\text{см}} \right)$$

Уравнение  
движения  
ионов  
Г. Йаффэ  
1913г.

$$\frac{e}{\mu_{\pm}} \cdot \frac{\partial n_{\pm}}{\partial t} = - \left( \pm e E \cdot \frac{\partial n_{\pm}}{\partial z} \right) + kT \cdot \Delta n_{\pm} - 8\pi k_a e^2 \cdot n_{+} \cdot n_{-}$$

$$2. Q = Q_0 \cdot \underbrace{\frac{\lambda}{d} (1 - e^{-\frac{d}{\lambda}})}_{F_{ATT}} \cdot \frac{E}{E_0} \cdot \ln \left( 1 + \frac{E_0}{E} \right), \text{ где } E_0 = 470 \left( \frac{\text{кВ}}{\text{см}} \right)$$

$$F_{ATT} = \frac{\lambda}{d} (1 - e^{-\frac{d}{\lambda}}) = \frac{Q_{After}}{Q_{Before}}, \text{ где } \lambda = \frac{\alpha \cdot E}{p},$$

$$d = 0.07 \text{ см}, \alpha = 0.14 \frac{\text{ppm} \cdot \text{см}^2}{\text{В}}$$

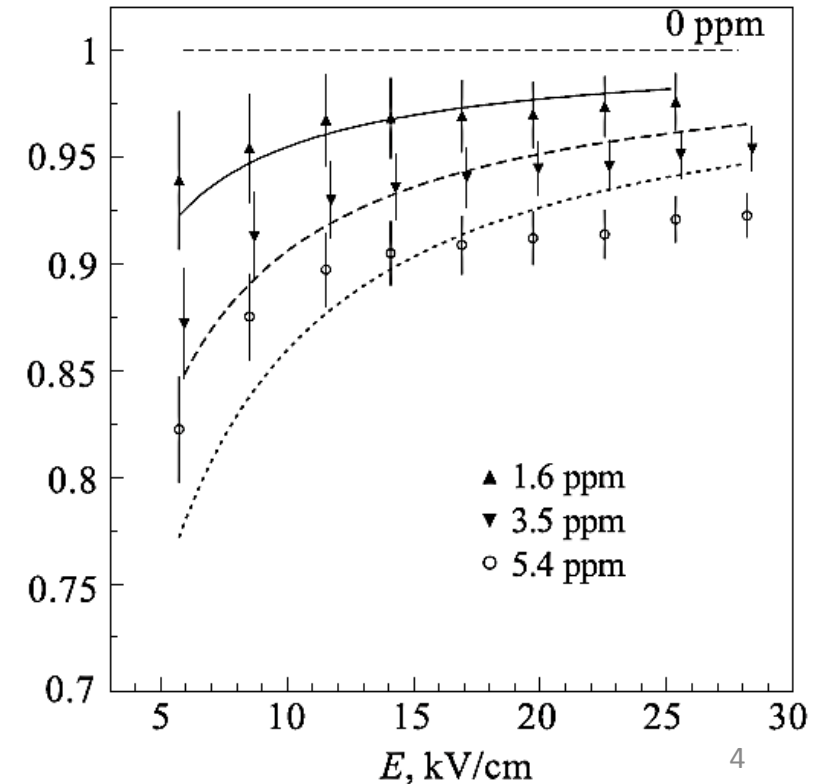
$p$  - концентрация кислорода в ppm (1 на  $10^6$  атомов)

1. W. Hofmann et al., Production and transport of conduction electrons in a liquid argon ionization chamber, Nucl. Instr. And Method v.135, 1976, p.151-156.

2. J. Thomas, D.I. Imel, Recombination of electron-ion pairs in liquid argon and liquid xenon, Physical Reveiw A36 No.2, 1987, p.614-616.

Методика нахождения концентрации атомов кислорода при облучении материалов и электроники жидкоаргоновых калориметров  $\gamma$ -квантами и быстрыми нейтронами через фактор ослабления заряда.  
( $F_{ATT}$  - Attenuation Factor)

Attenuation factor



### 3. Ионизация в жидком аргоне (2/2).

FCAL: 254R, 252C, 47T

Развитие методологии описания ионизации  
(получения более точной функции аппроксимации  
экспериментальных данных).

Предположение, что  $E_0$  не является константой, а зависит от  $E$ .  
Для экспериментальных данных, касающихся электроники  
FCAL-калориметра, использовалась улучшенная функция  
«бокс»-модели Томаса-Аймела для аппроксимации зарядовой  
кривой ионизации жидкого аргона от  $\alpha$ -частиц :

$$Q = F_N \cdot Q_0 \cdot \frac{E}{E_0} \ln \left( 1 + \frac{E_0}{E} \right), \text{ где } E_0 = a \left( 1 - k e^{-bE} \right) \left( \frac{\text{кВ}}{\text{см}} \right),$$

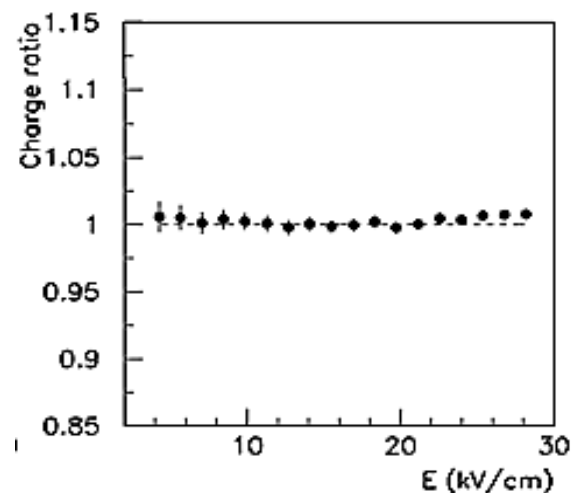
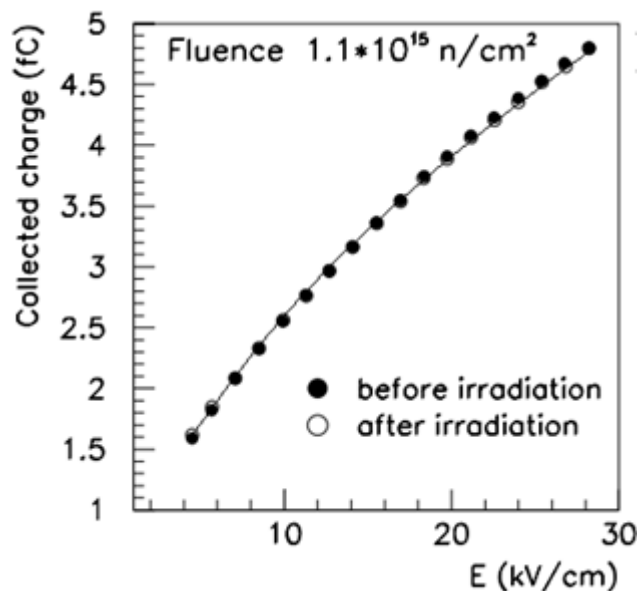
$$F_N = 0.997 \pm 0.005$$

Получены параметры аппроксимации зарядовой кривой  
ионизации жидкого аргона:

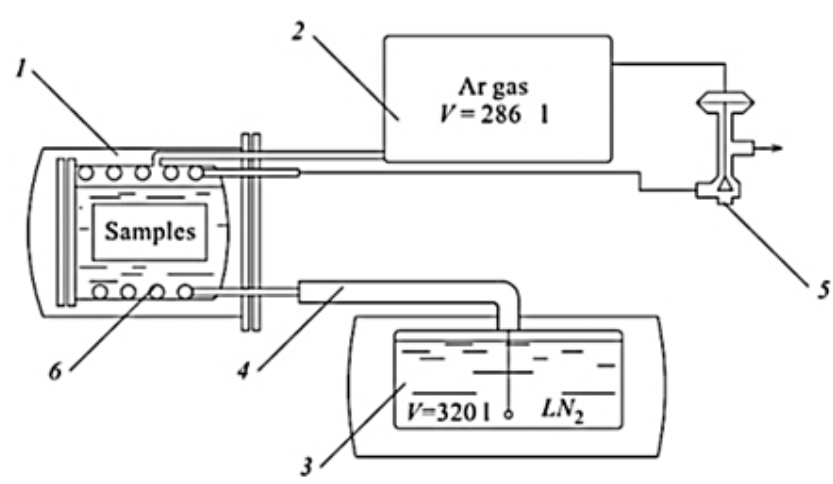
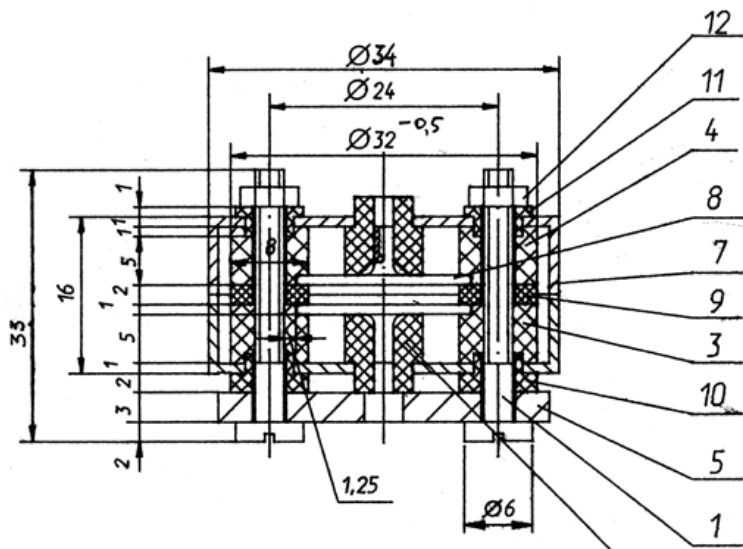
$$a = 720.6 \pm 5.6 \text{ кВ/см}, b = 0.083 \pm 0.004 \text{ см/кВ},$$

$$k = 0.48 \pm 0.01$$

Примечание.  $Q_0 = e \frac{E_\alpha}{W} = 37.1$  (фКл) для  $\alpha$ -источника Am-241.  
( $W = 23.6 \pm 0.5$  эВ и  $E_\alpha = 5.468$  МэВ )

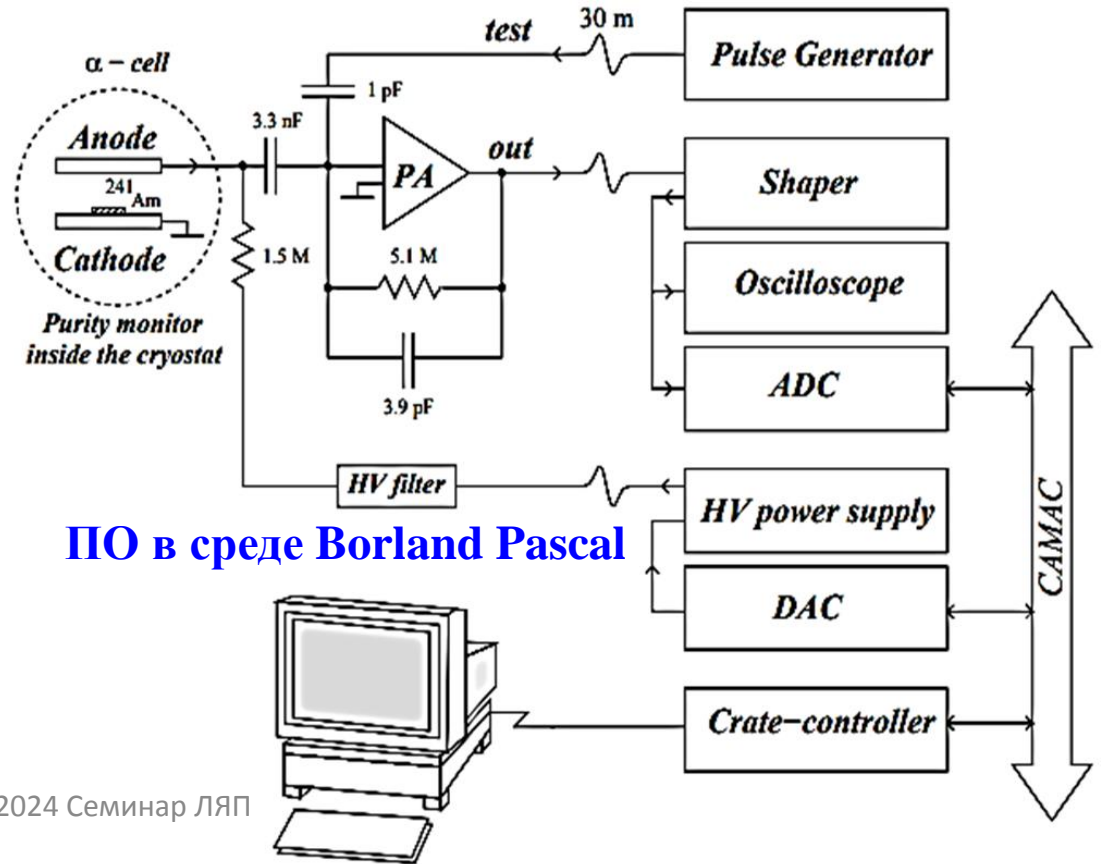
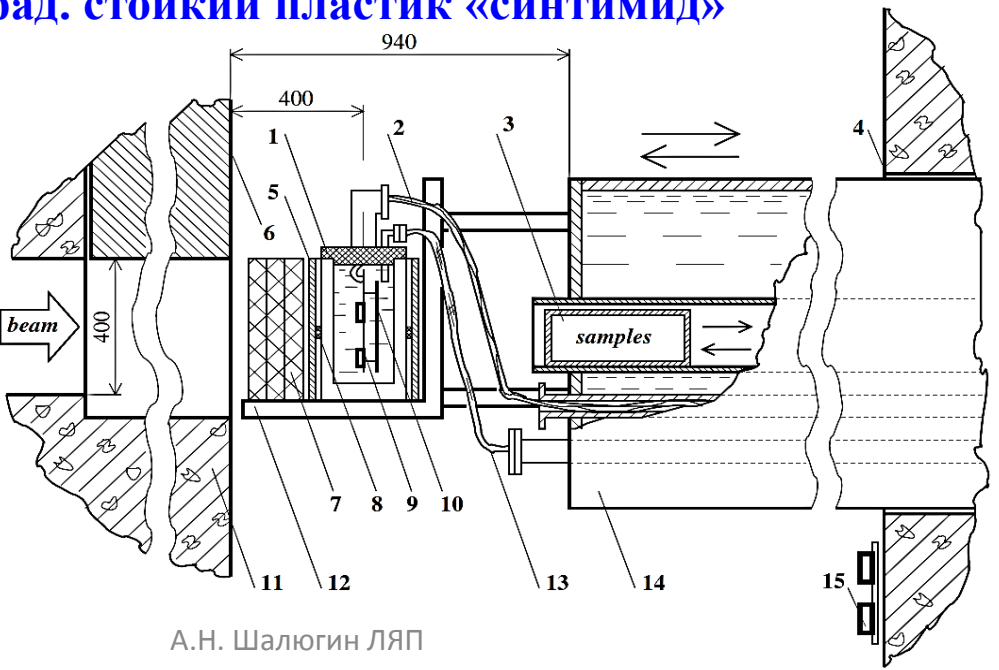


# 4. Загрязнение кислородом жидкого аргона (1/4). Установка.



Параметры	ИК
Активность $\alpha$ -источника $Am^{241}$	7.7кВк/4 $\pi$
Энергия $\alpha$ -частиц	5.5 МэВ
Расстояние катод-анод	0.7 мм
Диаметр электродов	18 мм
Диаметр активной зоны	9 мм
Отн-ие $\varnothing$ катода к $\varnothing$ актив.зоны	2

Материал втулок, шайб, гаек:  
рад. стойкий пластик «синтимид»



ПО в среде Borland Pascal



## 4. Загрязнение кислородом жидкого аргона (2/4). Инспекция на установке.

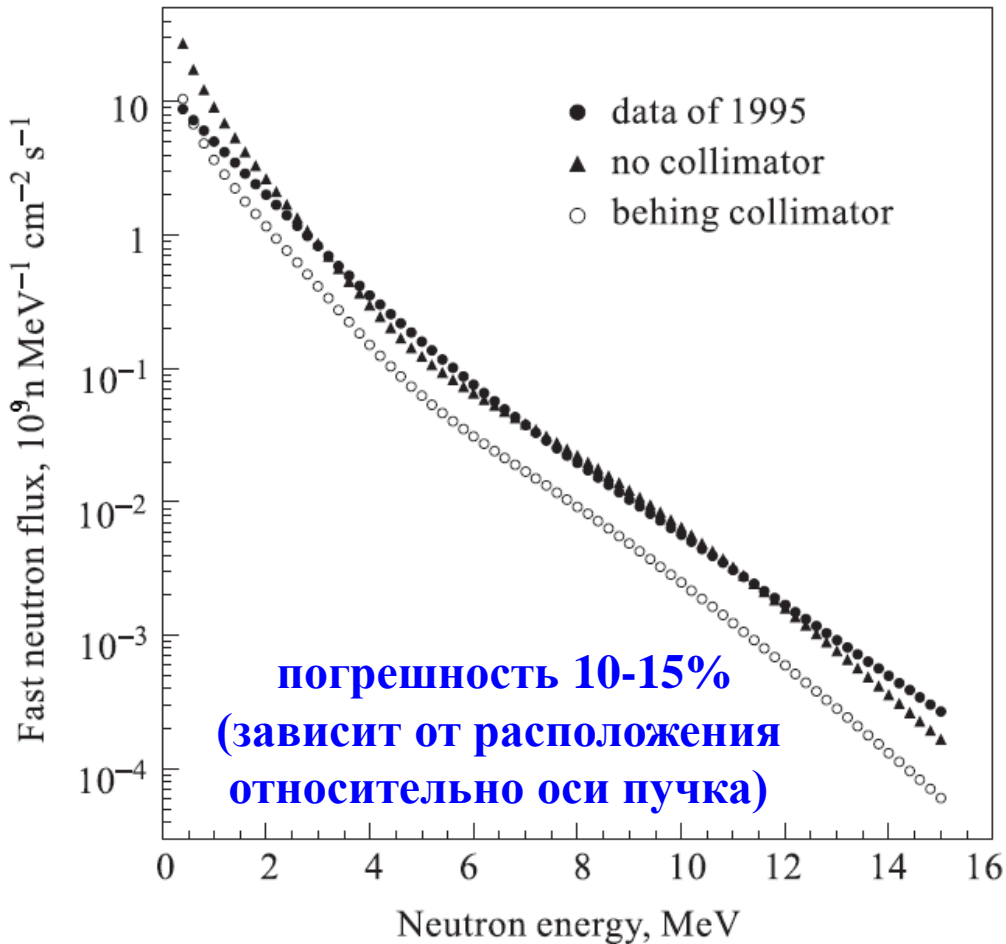


Инспекция многофункциональной установки  
Крис Орам (Chris Oram)      Хорст Оберлак (Horst Oberlack)



## 4. Загрязнение кислородом жидкого аргона (3/4). Спектр нейтронов. Гамма-доза.

Нейтронным активационным анализом измеряется выход следующих пороговых реакций:  $In^{115}(n,n')In^{115m}$ ,  $Ni^{58}(n,p)Co^{58}$ ,  $Fe^{54}(n,p)Mn^{54}$ ,  $Ti^{46}(n,p)Sc^{46}$ ,  $Ti^{47}(n,p)Sc^{47}$ ,  $Ti^{48}(n,p)Sc^{48}$ ,  $Al^{27}(n,\alpha)Na^{24}$ , который позволяет построить спектр.



Средняя тепловая мощность	2 МВт
Пиковая мощность	1500 МВт
Уровень мощности между импульсами	0,1 МВт
Длительность импульса мощности (ПШПМ)	215 мкс
Частота повторения импульсов	5 Гц
Пиковая плотность потока тепловых нейтр. на замедлителе	$1 \cdot 10^{16} \text{ н см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ 2л

Дозиметры  
 TLD-термолюминесцентные  
 PAD-фотолюминесцентные  
 аланиновые  
 RPL-радиофотолюминесцентные

$\gamma$ -излучение (Грей/ч) с:  
**Рв-фильтром**

Дозиметр	Перед криостат	Внутри криостата	За криостат
$D_{\gamma\_TLD}$		48±8	
$D_{total\_PAD}$	1164±16		435±3
$D_{total\_RPL}$	759±60		195±27

**(n,γ)-конвертором ( $B_4C$ )**

Дозиметр	Перед криостатом	За криостатом
$D_{\gamma\_TLD}$	466±40	170±10
$D_{total\_PAD}$	627±19	216±4
$D_{total\_RPL}$	673±89	226±51

ИБР-2: физический пуск в 1984г.

Топливо: 90кг  $PuO_2$  Замедлитель:  $H_2O$

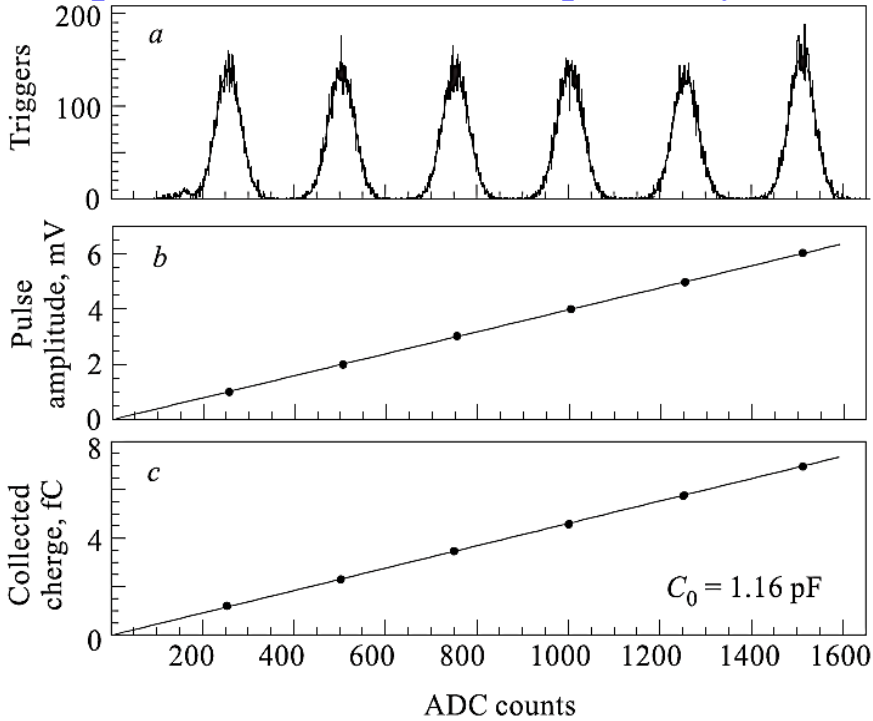
Теплоноситель: Na Отражатель: Be/Fe

Цикл работы реактора 250часов:  
 $1.0 \cdot 10^{16}$ нейтрон  $\text{см}^{-2}$ , 100 кГрей

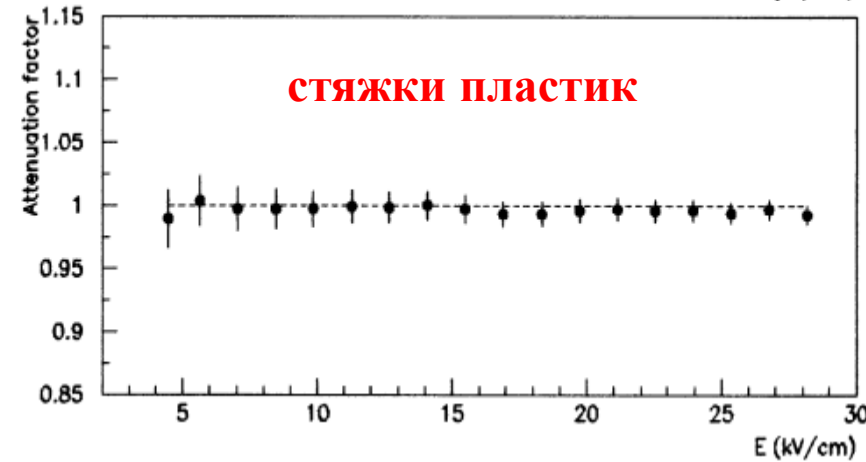
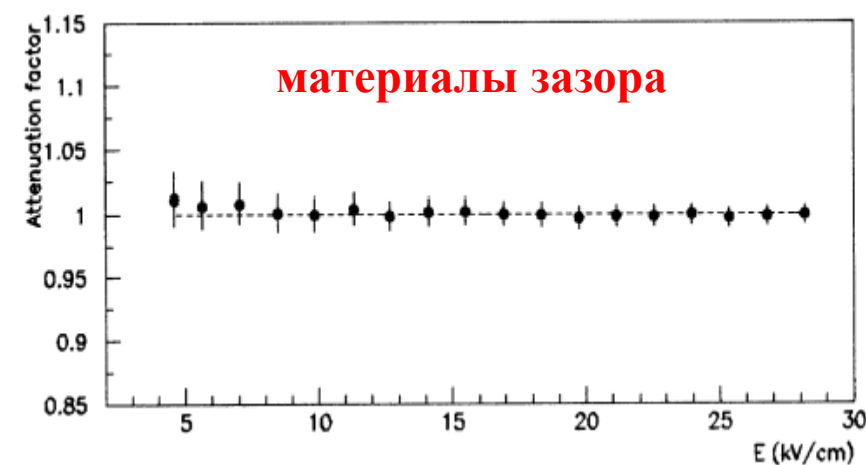
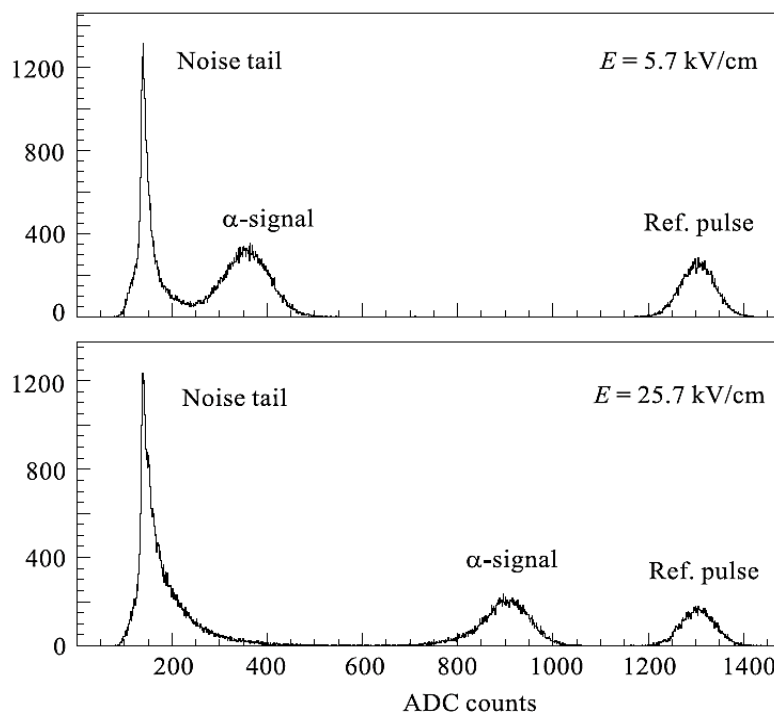


# 4. Загрязнения жидкого аргона (4/4). Фактор ослабления.

## Перевод шкалы АЦП в фемтоКулоны



## Высоковольтный скан



**Систематика  $\pm 1\%$**

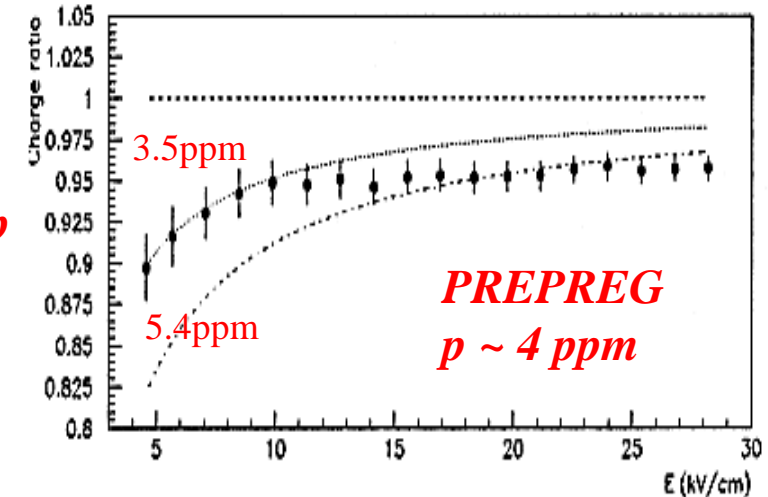
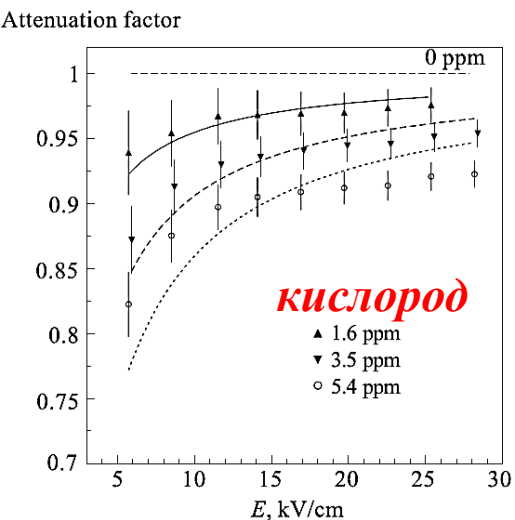
1. Калибровка шкалы АЦП и в/в скан 0.3-2.0 кВ с шагом 100 В до и после облучения.

2. Получение точек кривой фактора ослабления заряда как отношение  $Q_{After} / Q_{Before}$ .

3. Аппроксимация функцией со свободным параметром  $p$

$$F_{ATT} = \frac{Q_{After}}{Q_{Before}} = \frac{\alpha E}{d p} \left( 1 - e^{-\frac{d p}{\alpha E}} \right),$$

где  $p$  – концентрация кислорода в ppm.



## 5. Серийное производство.

**ЛЯП Корпус 113 Комната 112**



«Чистая  
комната»



Укладка  
модуля:  
Медная плита  
Honeycomb  
Электроды



Длительный  
тест (21день):  
напряжение  
2.5 кВ  
ток <300 нА  
Воздух

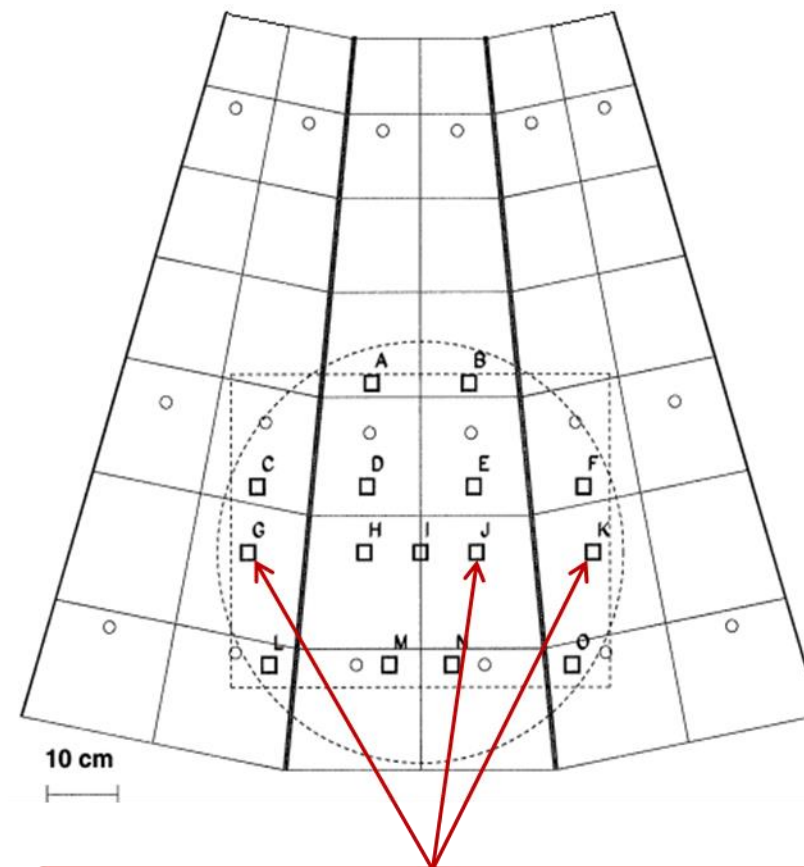
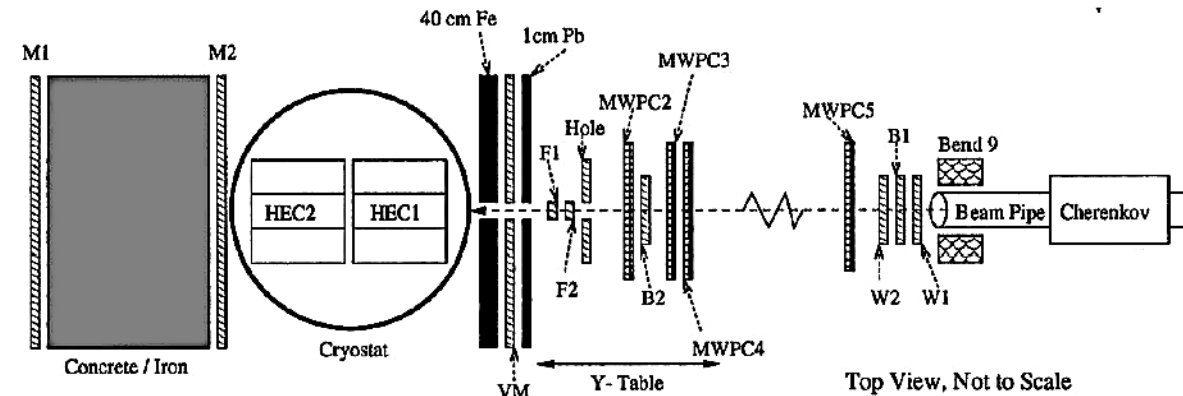


## 6. Тестовый пучок SPS-ускорителя(1/4).

Наименования	Значения
Макс. момент протонов	450 ГэВ/с
Название выводной мишени	T4 (H6-line)
Количество частиц в сбросе	$51.3 \cdot 10^{11}$
Множественность	11
Период сбросов	14.4 сек
Продолжительность сброса	2580 мсек

### Характеристики

- диапазон энергий: от 6 ГэВ до 200 ГэВ
- тип частиц: электроны, позитроны,  $\mu^\pm$ ,  $\pi^\pm$
- апертура триггерных счётчиков F1 и F2: 50\*50 кв. мм
- рабочая область для калибровки модулей  
 диаметр окна криостата: 60 см  
 зона отклонения магнитов (X,Y): 60см\*50 см
- база от BEVD-9 до криостата: 22.82 м (для определения угла входа частиц в модуль с помощью камер)
- газ смесь камер  $Ar + 27\% iso-C_4H_{10} + 2\% C_3H_8O_2 + 0,3\% CF_3Br$

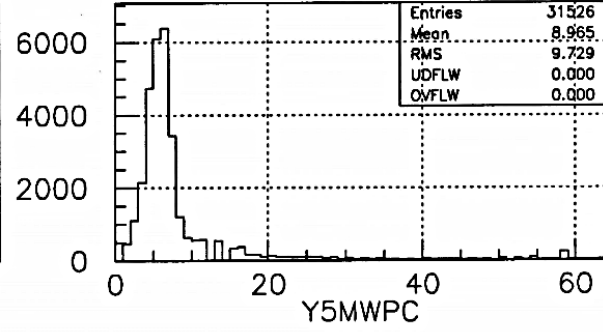
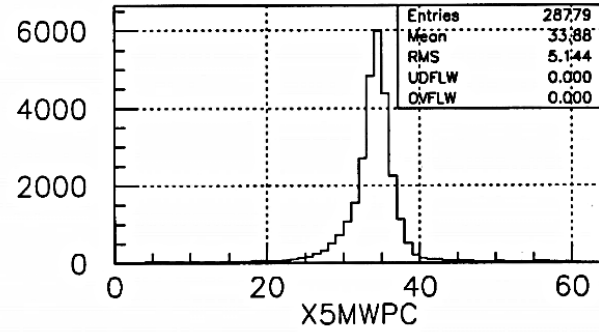
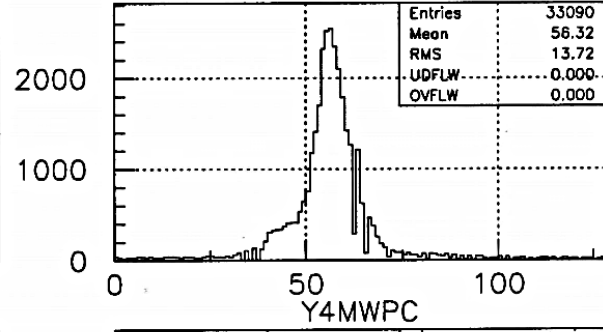
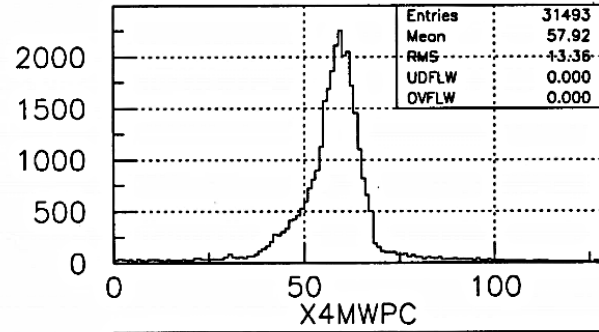
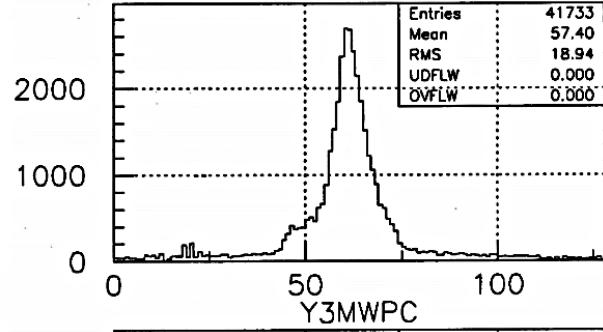
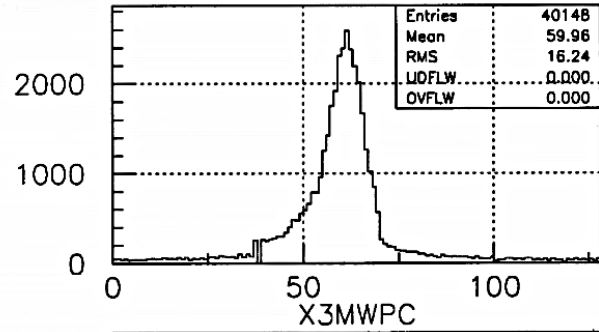
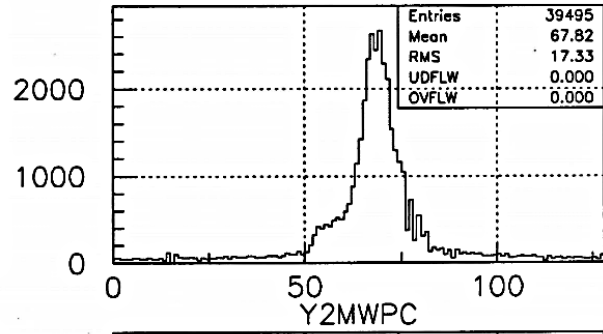
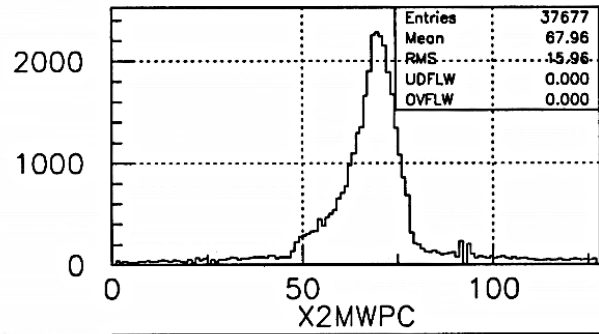


**Исследуемые точки входа частиц, относящиеся к трём модулям**

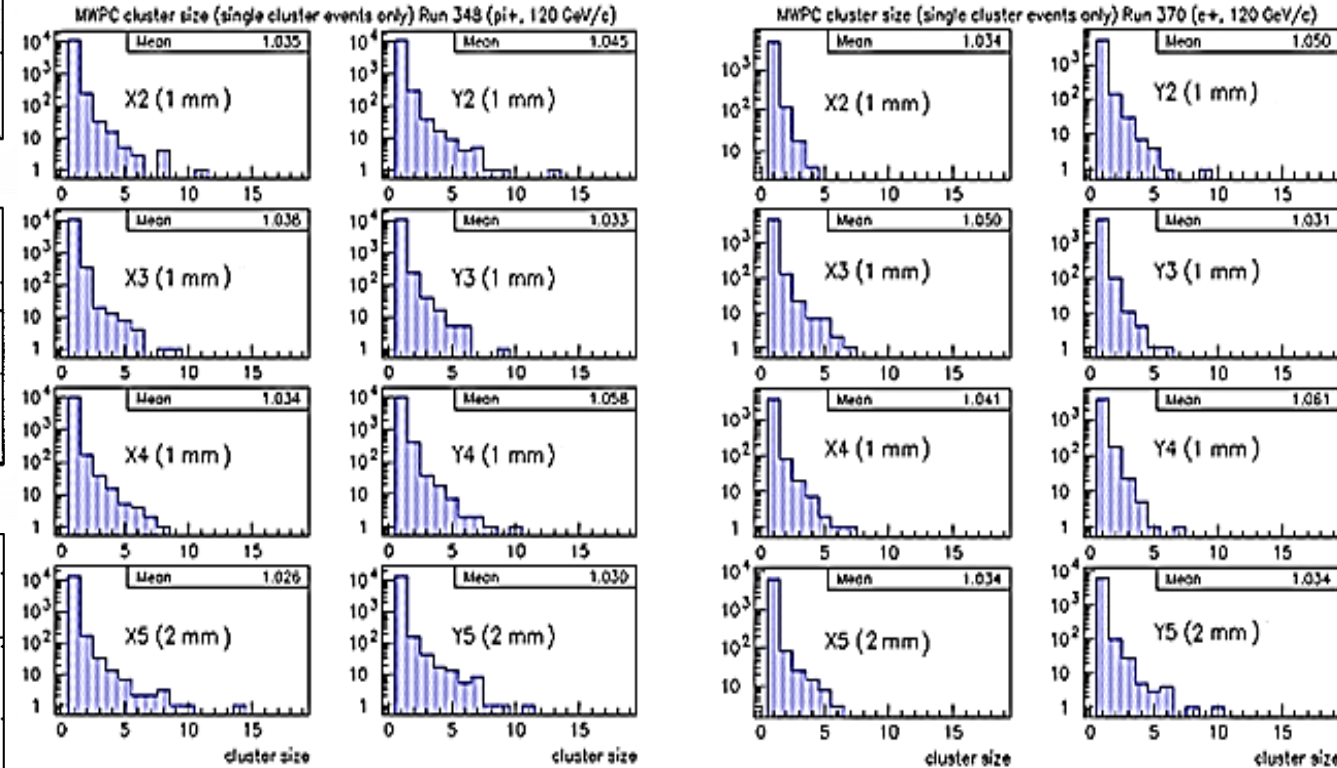


## 6. Тестовый пучок (2/4). Пучковые камеры.

Наименование	MWPC2-MWPC4	MWPC5
Диаметр проволочки, мкм	10	20
Шаг намотки проволоки, мм	1	2
Зазор анод-катод, мм	4	4
Эффективная площадь, мм	128 x 128	128 x 128
Напряжение питания, Вольт (выход на плато эффектив.)	3550	2750
Плато эффективности, Вольт	~400	~700



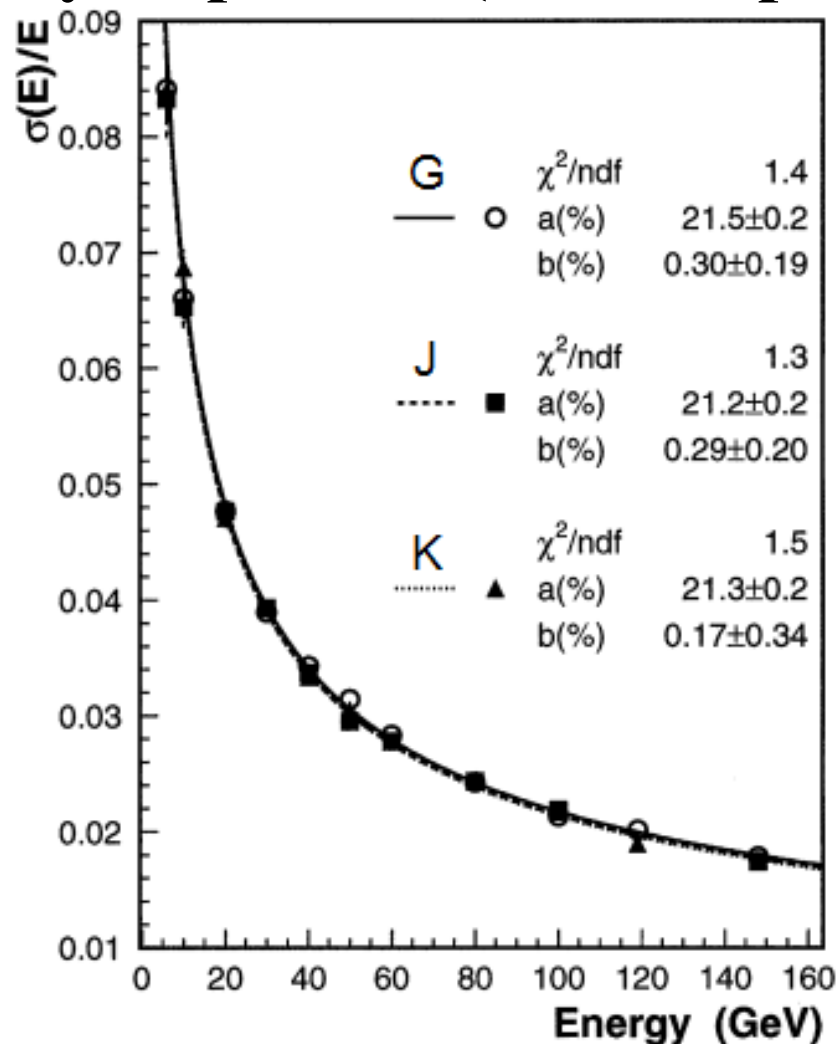
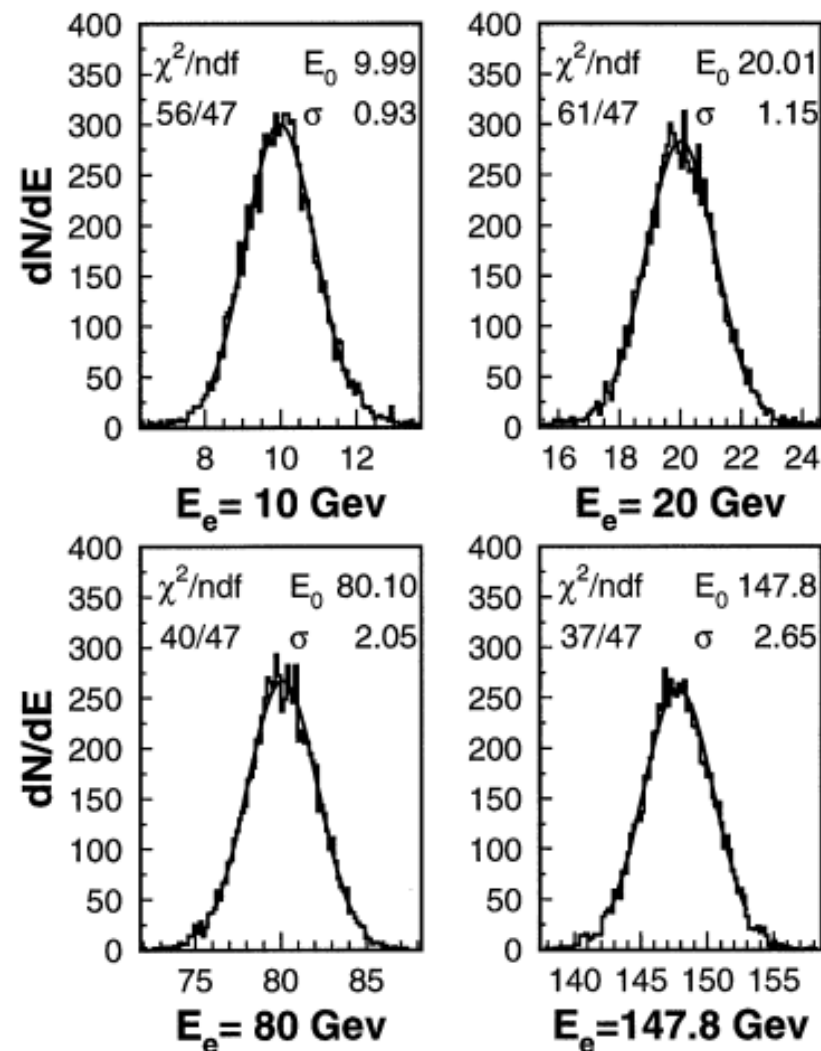
### Pions



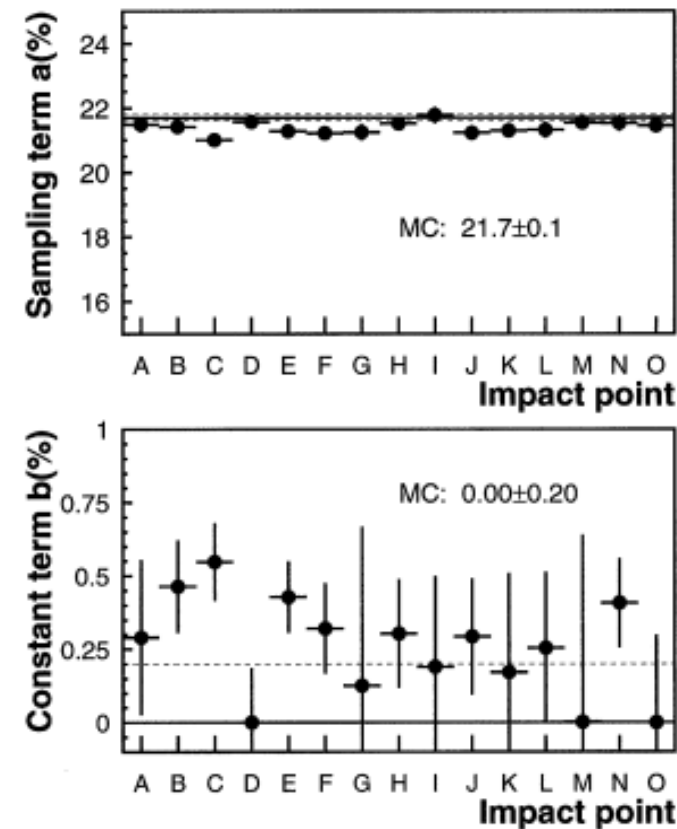
Средний размер кластера всех камер для  $\pi^+$   $1.035 \pm 0.006$

Средний размер кластера всех камер для  $e^+$   $1.041 \pm 0.010$

## 6. Тестовый пучок SPS-ускорителя (3/4). Разрешение на электронах.



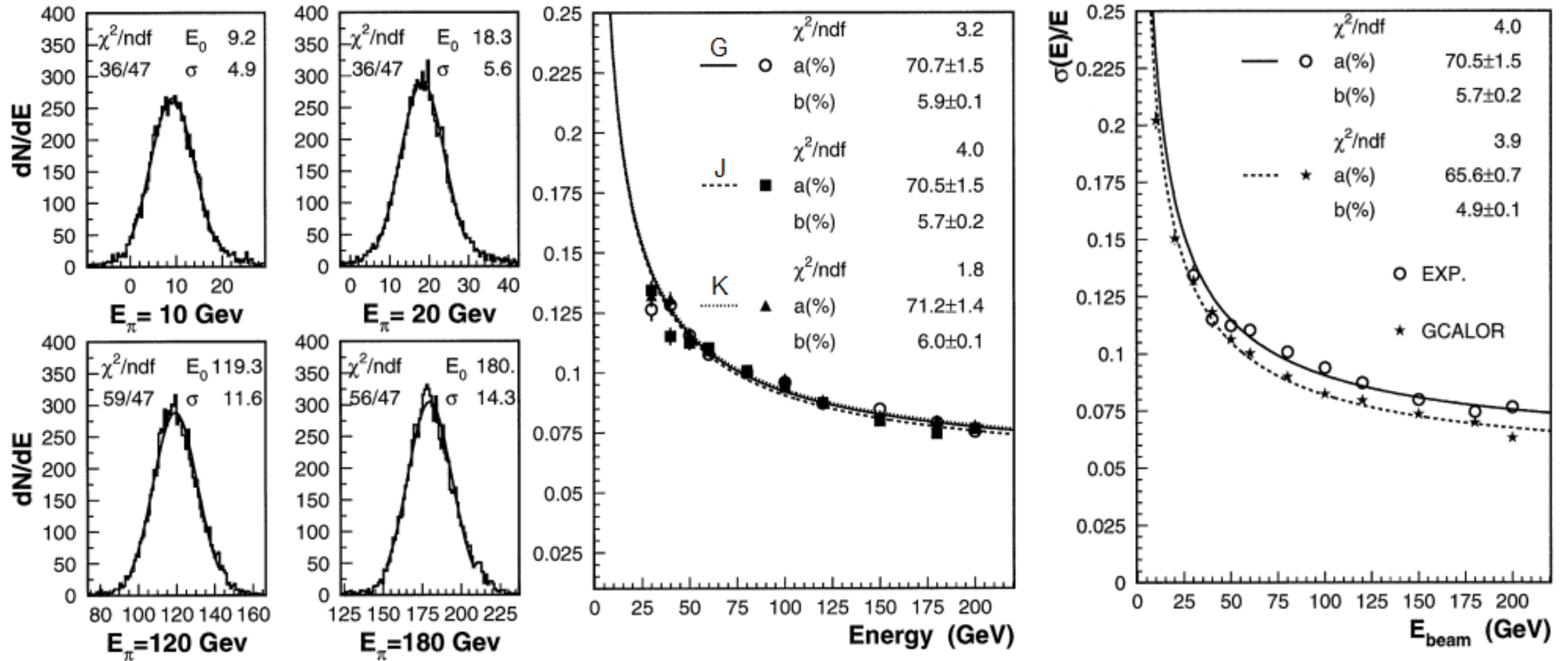
Значения стохастического члена  $a$  и постоянного члена  $b$  для всех точек от А до О



$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{a(\%)}{\sqrt{E(\text{ГэВ})}} \oplus b(\%)$$

Аппроксимация одной функцией трёх наборов данных из 3-х модулей (точки G, J, K) дает значение стохастического члена  $a = (21.4 \pm 0.2)\% \cdot \text{ГэВ}^{1/2}$  и постоянного члена  $b = (0.3 \pm 0.2)\%$  в сравнении со значениями из моделирования  $a_{MC} = (21.7 \pm 0.1)\% \cdot \text{ГэВ}^{1/2}$  и  $b_{MC} = (0.0 \pm 0.2)\%$ .

## 6. Тестовый пучок SPS-ускорителя (4/4). Разрешение на пионах.



$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{a(\%)}{\sqrt{E(\text{ГэВ})}} \oplus b(\%)$$

Аппроксимация одной функцией трёх наборов данных из 3-х модулей (точки G, J, K) дает значение стохастического члена  $a = (70.8 \pm 1.5)\% \cdot \text{ГэВ}^{1/2}$  и постоянного члена  $b = (5.9 \pm 0.1)\%$  в сравнении со значениями из моделирования GCALOR  $a = (65.6 \pm 0.7)\% \cdot \text{ГэВ}^{1/2}$  и  $b = (4.9 \pm 0.1)\%$ .



# 7. Радиационная стойкость системы н/в питания (1/2). Критерий.

POS.:	WORST LOCATION				BEST LOCATION			
	R (cm)	Z (cm)	SRL <sub>NIEL</sub> fast neutrons cm <sup>-2</sup> ·year <sup>-1</sup>	SRL <sub>TID</sub> Gy year <sup>-1</sup>	R (cm)	Z (cm)	SRL <sub>NIEL</sub> fast neutrons cm <sup>-2</sup> ·year <sup>-1</sup>	SRL <sub>TID</sub> Gy year <sup>-1</sup>
DETECTOR								
LAR EMB	300	320	5.6E +11	2.0E +01	300	655	4.0E +10	2.8E +00
LAR HEC	<b>210</b>	<b>450</b>	<b>1.3E +12</b>	<b>1.7E +01</b>	300	655	4.0E +10	2.8E +00
FCAL	60	613	1.8E +13	2.3E +02	300	655	4.0E +10	2.8E +00
TILE LB	397	10	6.0E +09	1.0E -01	411	130	9.8E +09	1.3E -01
<b>TILE LE</b>	<b>397</b>	<b>340</b>	<b>3.3E +10</b>	<b>2.2E -01</b>	411	460	4.6E +09	5.9E -02
MDT barrel	690	295	1.3E +10	5.6E -01	1030	1235	4.0E +09	1.2E -01
MDT end-cap	188	725	2.9E +11	2.8E +00	1183	2400	1.7E +09	1.4E -01
CSC	89	725	1.8E +12	1.1E +01	197	690	2.4E +11	3.1E +00
RPC	680	290	9.7E +09	5.6E -01	1020	1235	4.1E +09	2.0E -01
TGC Trigger	172	1280	2.0E +10	6.2E -01	1200	1437	3.6E +09	2.1E -01
TGS 2 <sup>nd</sup> coord.	200	690	2.2E +11	3.1E +00	600	690	1.7E +10	5.1E -01

	Описание	γ-кванты Грей	нейтроны н см <sup>-2</sup>
		RTC <sub>TID</sub>	RTC <sub>NIEL</sub>
SRL <sub>i</sub>	Промоделированный уровень излучения за 10 лет работы установки ATLAS на LHC	<b>2.2</b>	<b>3.3 10<sup>11</sup></b>
SFsim <sub>i</sub>	Фактор безопасности, учитывающий неопределённости в моделировании уровней излучения	<b>3.5</b>	<b>5</b>
SFlrd <sub>i</sub>	Фактор безопасности, учитывающий неопределённость от скорости набора излучения	<b>1.5</b>	<b>1.5</b>
SFlot <sub>i</sub>	Фактор безопасности, учитывающий технолог. различия при производстве купленных компонентов между собой	<b>2</b>	<b>2</b>
<b>RTC<sub>i</sub></b>	<b>Критерий радиационной стойкости за 10 лет работы LHC</b>	<b>23.1</b>	<b>4.95 10<sup>12</sup></b>

Критерий радиационной стойкости.

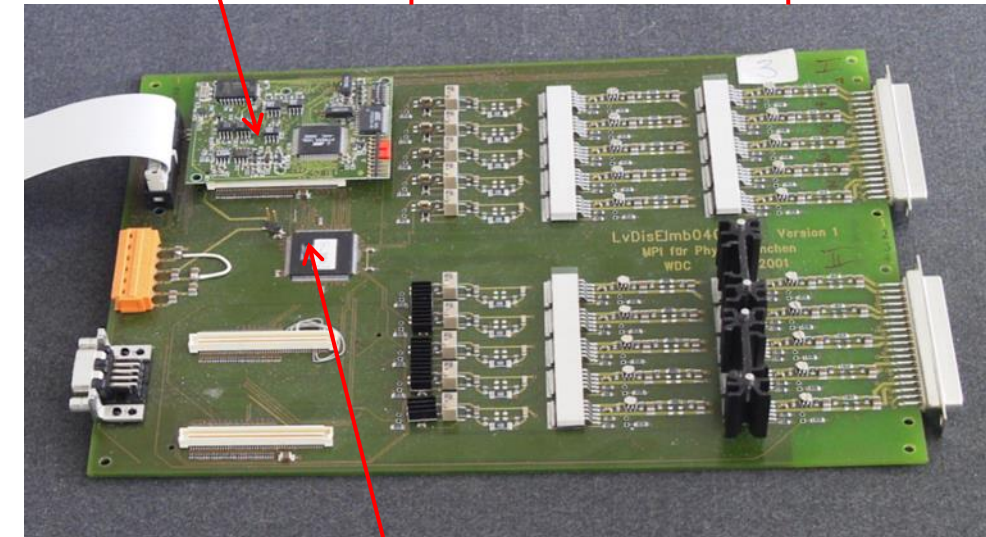
Методика RHAWG-группы.

$$RTC_i = 10 \cdot SRL_i \cdot SF_{sim_i} \cdot SF_{lrd_i} \cdot SF_{lot_i} (i = TID, NIEL)$$

**ELMB**

**8.0 10<sup>12</sup>**  
нейтронов  
см<sup>-2</sup>

**LHC 4913, LHC 7913**  
**1 МГрей и 1.9 10<sup>15</sup>**  
нейтрон см<sup>-2</sup>



QLchip

## 7. Радиационная стойкость системы н/в питания (2/2).

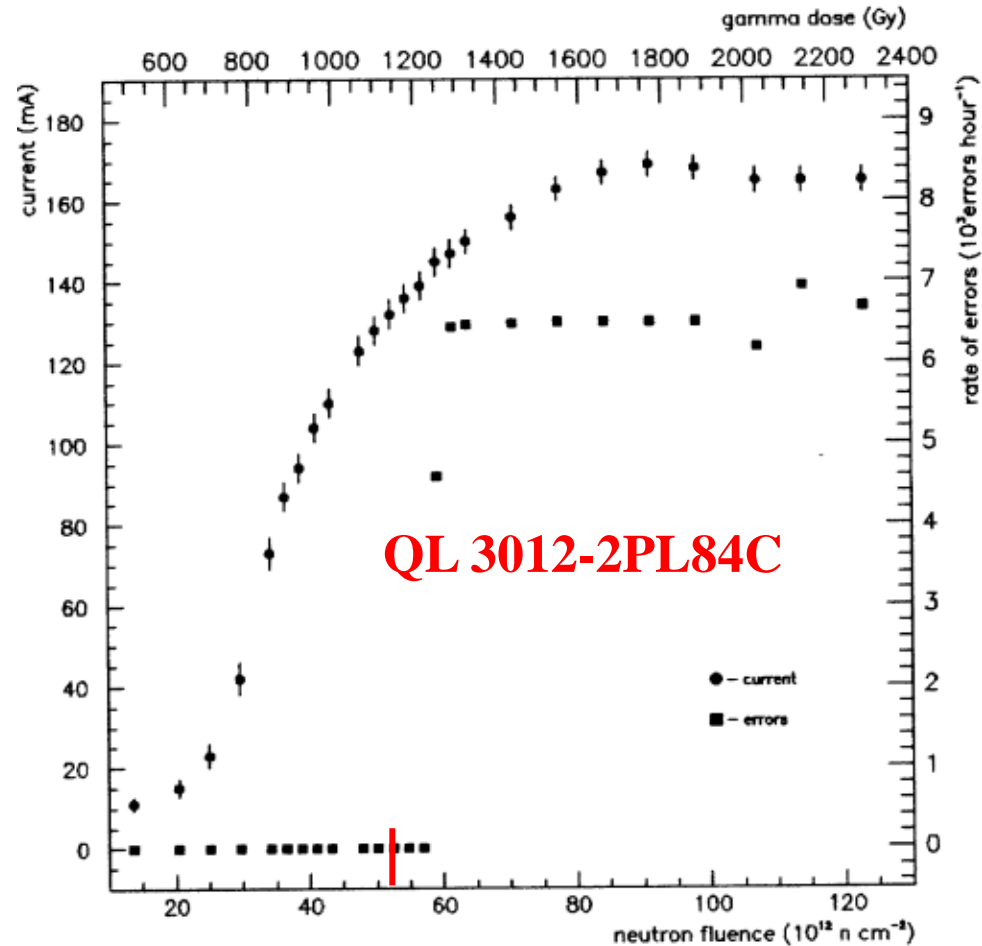
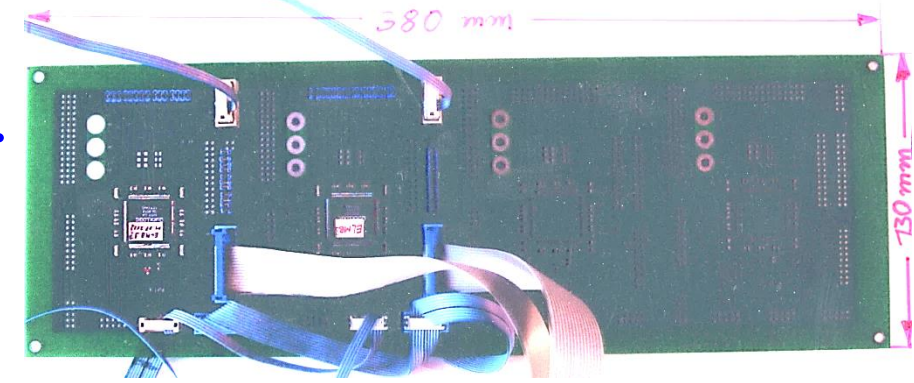
Тип: радиационно стойкая, однократно программируемая ASIC.

Логика: TTL (лог. «0»: ниже 0.8 В, лог. «1»: выше 2.4 В).

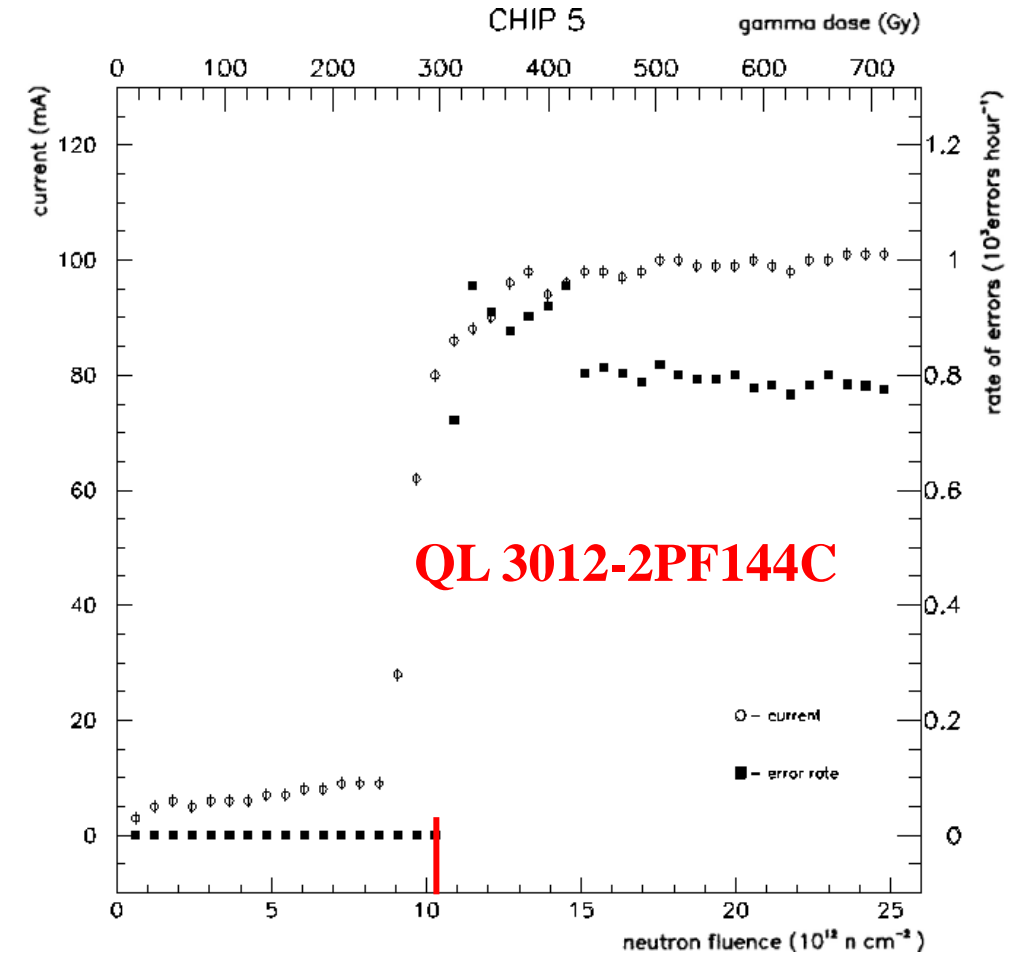
Производитель: Quick Logic Corp., США.

Он-лайн тест электрических свойств: ток потребления.

Он-лайн тест архитектуры: частота ошибок.



$(57 \pm 3) 10^{12}$  нейтрон см $^{-2}$  и  $(1250 \pm 450)$  Грей



$(11.1 \pm 2.5) 10^{12}$  нейтрон см $^{-2}$  и  $(381 \pm 52)$  Грей при токе  $63 \pm 6$  мА

## 8. Основные результаты работы отражены в выводах (1/2).

1. Создана физическая установка на канале №3 реактора ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ, включающая радиационно стойкую ионизационную камеру с  $\alpha$ -источником, электронный тракт регистрации и систему сбора данных, для проведения исследований загрязнения кислородом жидкого аргона материалами и электронными компонентами жидкоаргоновых калориметров (HEC, EMES, FCAL) в сильных радиационных полях (суммарно получены  $\gamma$ -доза  $\sim 1$  МГрей и поток  $\sim 10^{17}$  нейтронов  $\text{см}^{-2}$ ).
2. Показана необходимость исключения печатных плат из материала PREPREG из жидкоаргоновых калориметров из-за загрязнения кислородом жидкого аргона на уровне  $\sim 4$  ppm при дозе  $\gamma$ -излучения 96кГр и интегральном потоке  $1.0 \cdot 10^{16}$  нейтрон  $\text{см}^{-2}$  и возможность использования остальных материалов и электронных компонентов в жидкоаргоновых калориметрах (HEC, EMES, FCAL).
3. На созданной ионизационной камере экспериментально получены параметры функции аппроксимации зарядовой кривой ионизации жидкого аргона от  $\alpha$ -источника в рамках современной интерпретации «бокс»-модели:  $a = (720.6 \pm 5.6) \text{ кВ/см}$ ,  $b = (0.083 \pm 0.004) \text{ см/кВ}$ ,  $k = (0.48 \pm 0.01)$ .



## 8. Основные результаты работы отражены в выводах (2/2).

4. Определена радиационная стойкость системы контроля и управления низковольтным питанием НЕС-калориметра, состоящей из следующих элементов: QL- контроллера, ELMV-интерфейса и регуляторов напряжений положительной и отрицательной полярности, которая составляет  $(381 \pm 52)$  Грей по дозе ионизирующего излучения и  $(11.1 \pm 2.5) \cdot 10^{12}$  нейтронов  $\text{см}^{-2}$  по потоку неионизирующего излучения до 20 МэВ. Эти величины удовлетворяют критериям радиационной стойкости.

5. Создана трековая часть установки для тестирования модулей НЕС-калориметра и проведения комбинированных тестов с модулями ЕМЕС и FСAL на базе пучковых двухкоординатных пропорциональных камер (8 плоскостей) на тестовом пучке SPS-ускорителя (CERN).

6. Проведена проверка 33-ти передних и задних модулей НЕС-калориметра на тестовом пучке SPS-ускорителя (CERN). Получены значения стохастического члена  $a$  и постоянного члена  $b$  энергетического разрешения для электронов  $a = (21.4 \pm 0.2)\% \cdot \text{ГэВ}^{1/2}$  и  $b = (0.3 \pm 0.2)\%$ , а также заряженных пионов  $a = (70.8 \pm 1.5)\% \cdot \text{ГэВ}^{1/2}$  и  $b = (5.9 \pm 0.1)\%$ .

# **БЛАГОДАРНОСТИ**

*Автор глубоко благодарен своему научному руководителю д.ф.-м.н. В.В. Глаголеву за научное руководство, внимание к работе, ценные советы и постоянную поддержку.*

*Хочу выразить глубокую признательность Первому руководителю темы ATLAS в ОИЯИ д.ф.-м.н. Н.А. Русакович за политическую и финансовую поддержку.*

*Также хочу выразить особую признательность руководящему составу группы жидкоаргонового калориметра в ОИЯИ – к.ф.-м.н. В.В. Кухтину, к.ф.-м.н. А.П. Чеплакову, к.ф.-м.н. М.Ю. Казаринову, к.т.н. Ю.А. Усову,*

*создателям пропорциональных камер установки ГИПЕРОН – к.ф.-м.н. А.А. Фещенко, к.ф.-м.н. Ю.И. Давыдову, к.ф.-м.н. И.Е. Чирикову-Зорину,*

*соучастникам сборки модулей – А.Б. Лазареву, С.Н. Шилову, С.И. Какурину,*

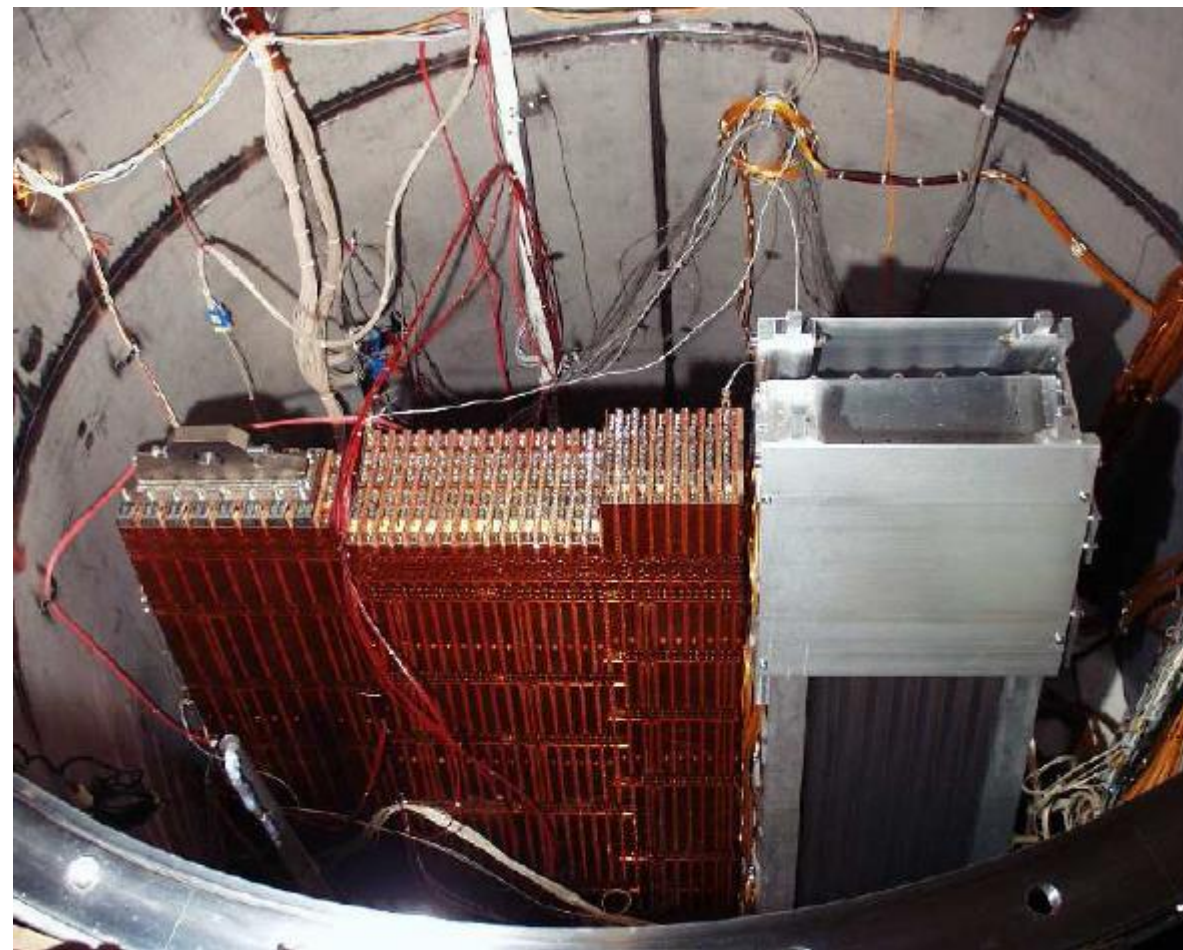
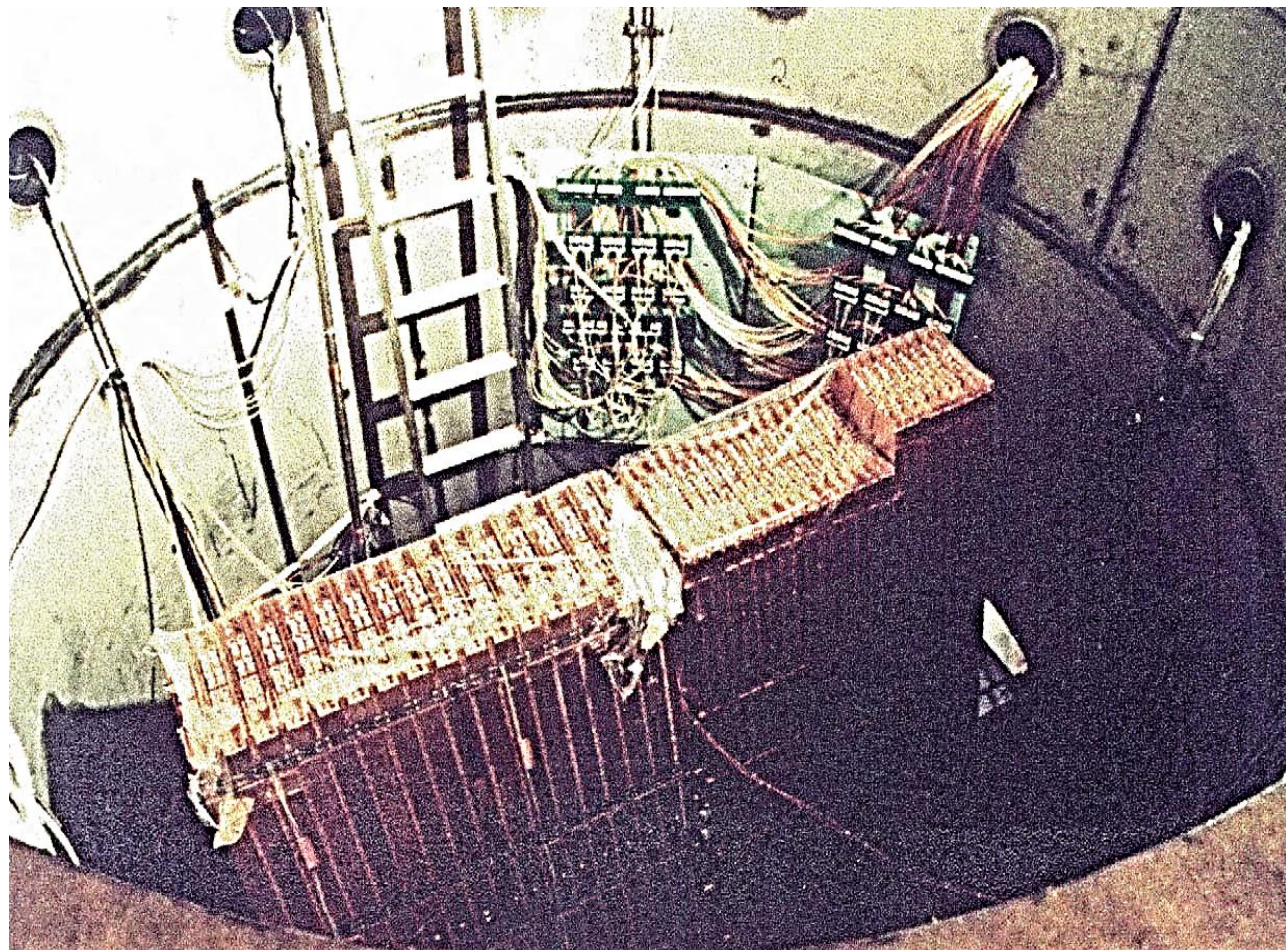
*соучастникам радиационных тестов на реакторе ИБР-2 – к.т.н. Е.А. Ладыгину, Г.А. Ярыгину, С.М. Голубых за неоценимую помощь и неоднократные полезные обсуждения.*

## Список публикаций

- 1) D.M. Gingrich, ..., A. Shalyugin et al., Construction, assembly and testing of the ATLAS hadronic end-cap calorimeter, *Journal of Instrumentation*, 2007-2-P05005 33pp.
- 2) C. Leroy, ..., A. Shalyugin et al., Liquid argon pollution tests of the ATLAS detector materials at the IBR-2 reactor in Dubna, *Part. Nucl. Lett.*, 2000 №5(102) p.5-19.
- 3) C. Leroy, ..., A. Shalyugin et al., Irradiation tests of ATLAS liquid argon forward calorimeter (FCAL) electronics components, ATL-LARG-2002-003, CERN, Geneva, 19pp.
- 4) C. Leroy, ..., A. Shalyugin et al., Radiation hardness studies of components of the ATLAS Forward and Hadronic End Cap calorimeters at Dubna, 8-th International Conference on Calorimetry in High Energy Physics (CALOR Lisbon 1999), World Scientific, Singapore, 2000, p.653-660.
- 5) C. Leroy, ..., A. Shalyugin et al., Liquid argon pollution tests of ATLAS detector materials at the IBR-2 reactor in Dubna, 7-th International Conference on Advanced Technology and Particle Physics (ICATPP Como 2001), World Scientific, New Jersey, 2002, p.800-805.
- 6) C. Leroy, ..., A. Shalyugin et al., Irradiation tests of readout chain components of the ATLAS liquid argon calorimeters, *Part. Nucl. Lett.*, 2000 №5(102) p.20-24.
- 7) B. Dowler, ..., A. Shalyugin et al., Performance of the ATLAS hadronic end-cap calorimeter in beam tests, *Nucl. Instrum. Meth. A482* (2002), p.94-124.
- 8) C. Cojocar, ..., A. Shalyugin et al. Hadronic calibration of the ATLAS liquid argon end-cap calorimeter in the pseudorapidity region  $1.6 < |\eta| < 1.8$  in beam test, *Nucl. Instrum. Meth. A531* (2004), p.481-514.
- 9) J. Pinfold, ..., A. Shalyugin et al., Performance of ATLAS liquid argon endcap calorimeter in the pseudorapidity region  $2.5 < |\eta| < 4.0$  in beam tests, *Nucl. Inst. and Method A593* (2008), p.324-342.
- 10) J. Pinfold, ..., A. Shalyugin et al., Evaluation of the local hadronic calibration with combined beam-test data for the endcap and forward calorimeters of ATLAS in the pseudorapidity region  $2.5 < |\eta| < 4.0$  in beam tests, *Nucl. Inst. and Method A693* (2012), p.74-97.
- 11) Ю.И. Давыдов, ... А.Н. Шалюгин и др., Трековая система модернизированного спектрометра «Гиперон». Сообщение ОИЯИ P13-94-411, Дубна, 1994, 13с.
- 12) N.J. Buchanan, ..., A. Shalyugin et al., Radiation qualification of the front-end electronics for the readout of the ATLAS liquid argon calorimeters, *Journal of Instrumentation*, 2008-3-P10005 43pp.
- 13) J. Ban, ..., A. Shalyugin et al. Radiation hardness tests of GaAs amplifiers for liquid argon calorimetry. JINR-E13-95-222, MPI-PHE-95-08 May 1995, 12pp.
- 14) A. Cheplakov, ..., K. Jakobs, ..., A. Shalyugin et al. Radiation hardness of GaAs preamplifiers for liquid argon calorimetry at LHC, JINR-E13-96-358, MPI-PHE-96-15 Nov 1996, 13pp.
- 15) J. Ban, ..., A. Shalyugin et al., Radiation hardness tests of GaAs amplifiers operated in liquid argon in the ATLAS calorimeter, *Nucl. Inst. and Method A594* (2008), p.389-394.



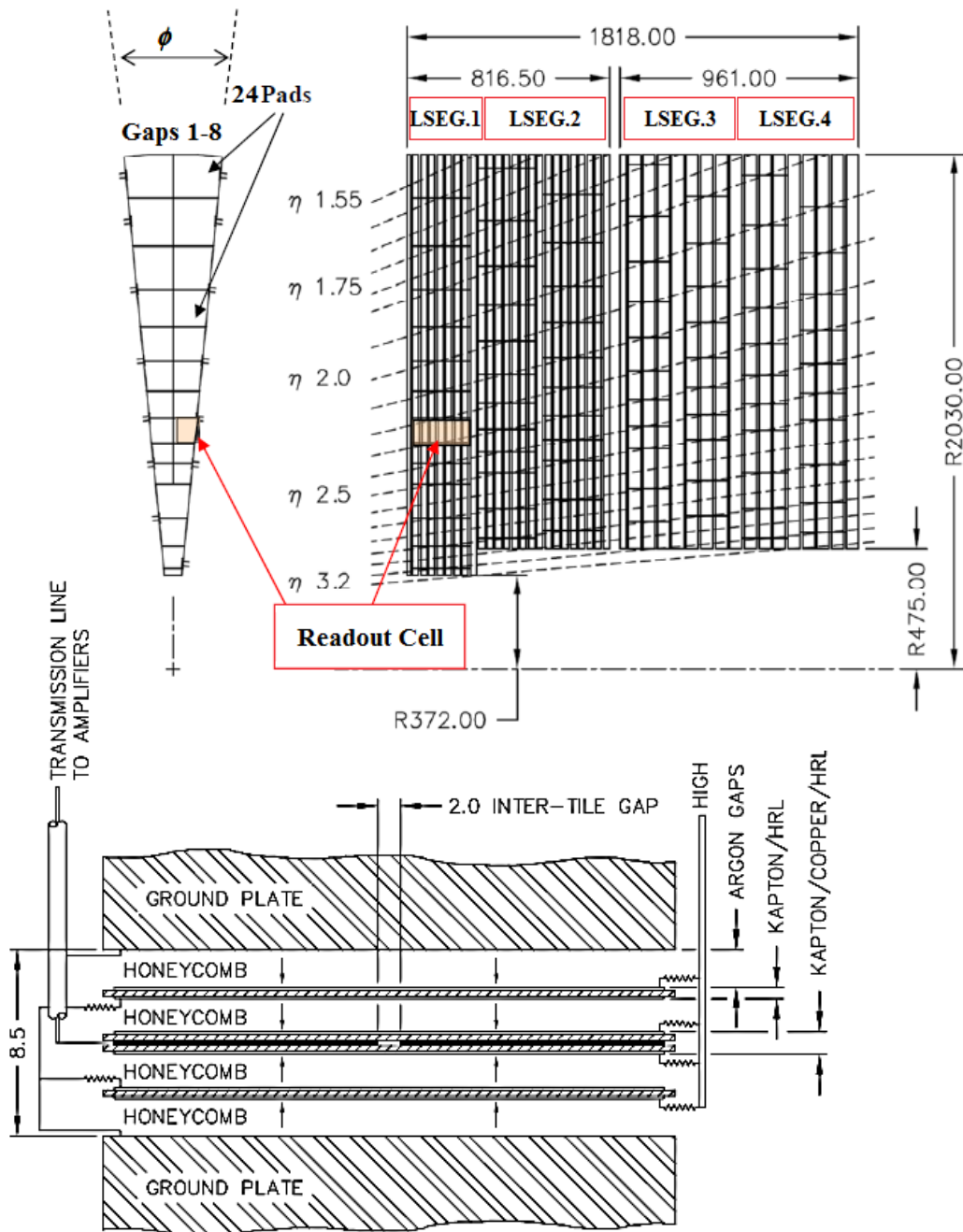
# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !





# АРХИВ

## 2. НЕС-калориметр.



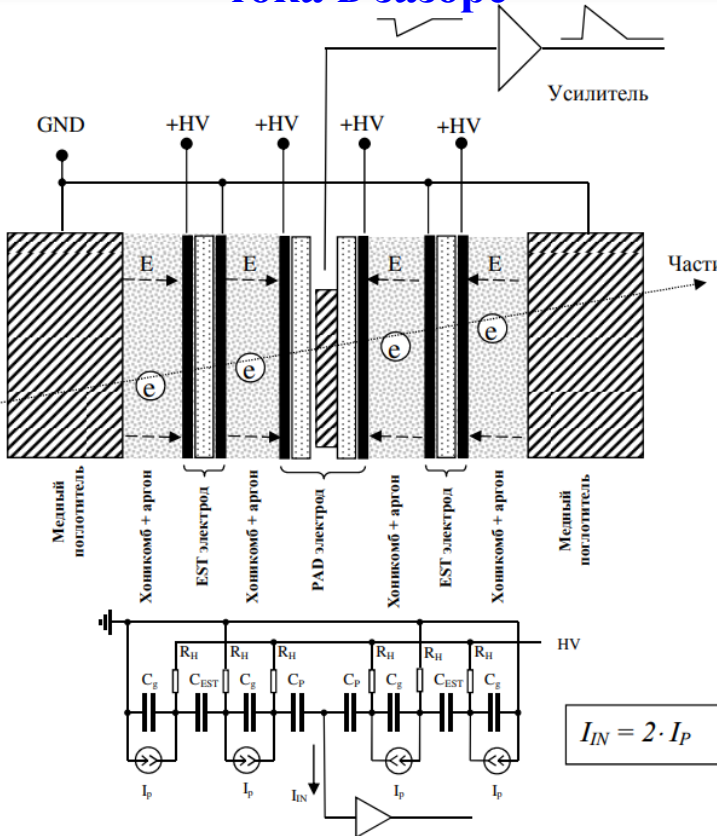
Параметры	НЕС1 (передний)	НЕС2 (задний)
Количество медных плит (поглотитель)	25	17
Толщина первой медной плиты в модуле	12.5 мм	25.0 мм
Толщина стандартной медной плиты в модуле	25.0 мм	50.0 мм
Вес стандартной медной плиты	90 кг	180 кг
Вес модуля	2103 кг	2811 кг
Размер большого зазора между плитами	8.500 мм	8.500 мм
Размер зазора между электродами (gap)	1.969 или 1.954мм	1.969 или 1.954мм
Толщина коврика из Honeycomb-материала	1.816 мм	1.816 мм
Общая толщина ROB- и EST-электродов	0.625 или 0.685мм	0.625 или 0.685мм
Количество сегментов считывания	2	2
Кол-во больших зазоров считывания в сегментах	8+16 = 24	8+8 = 16
Количество триггерных зон типа tower («башня»)	24+23 = 47	21+20 = 41
Количество плат предусилителей	3	2
Количество чипов предусилителей	42	28
Количество линий низковольтного питания	12	8
Количество распределительных плат калибровки	1	1
Количество линий калибровочных сигналов	28	16
Количество линий высоковольтного питания	4+4 = 8	4+4 = 8
Количество стягивающих шпилек в модуле	7	7
Диаметр стягивающих шпилек	12 мм	16 мм
Нагрузка на стягивающую шпильку	78 МПа	79 МПа
Нагрузка на стержень резьбы стягивающей шпильки	112 МПа	118 МПа
Внешний диаметр спейсеров для больших зазоров (8.50мм)	17 мм	23 мм
Макс. нагрузка спейсера на медную плиту	138 МПа	138 МПа



## 2. НЕС-калориметр.

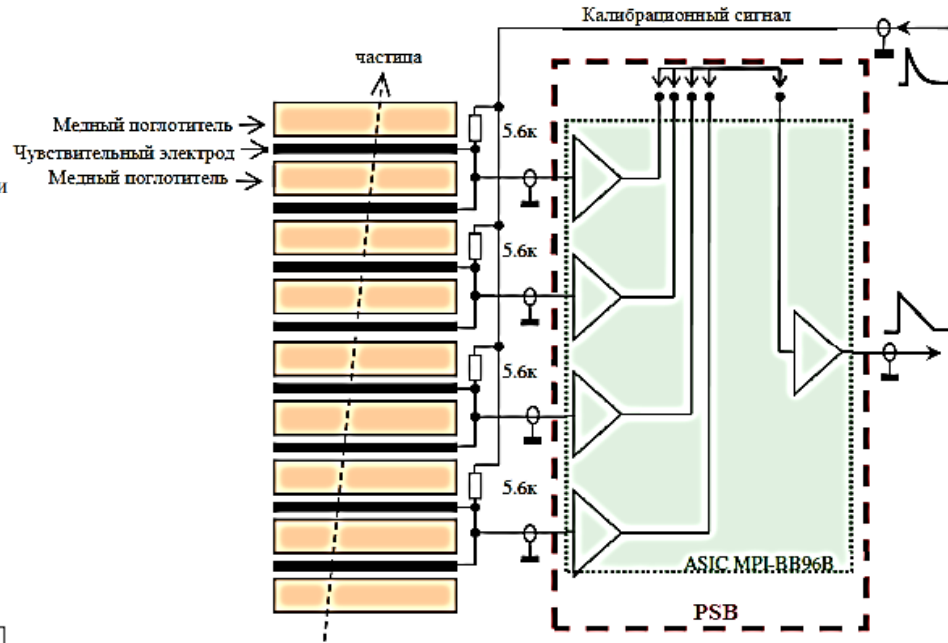
### Электроника: внутри и снаружи криостата.

#### Детектирование ионизационного тока в зазоре

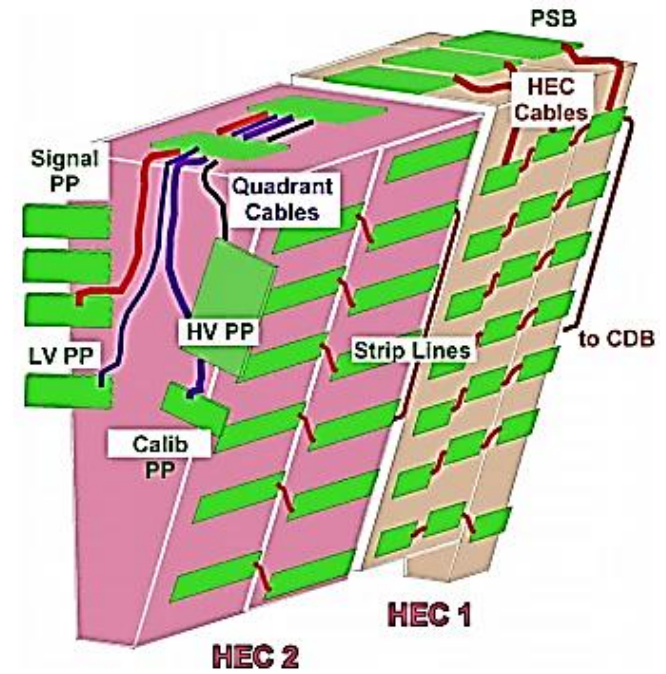


А.Н. Шалюгин ЛЯП

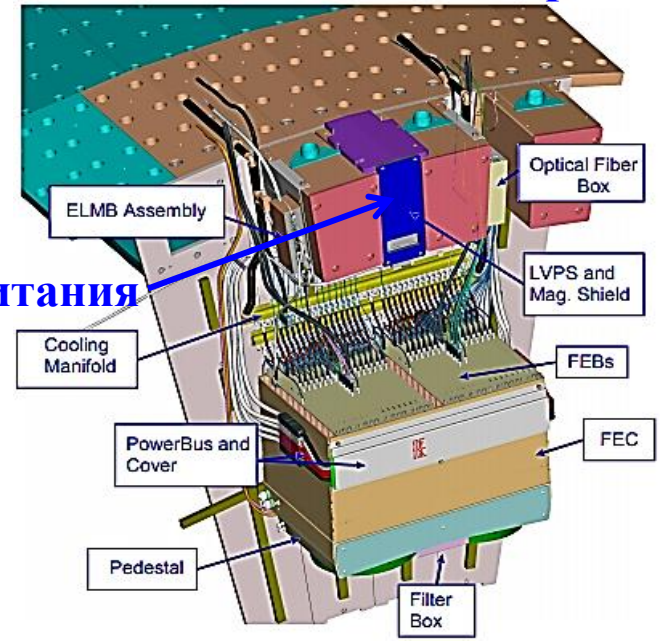
#### «Холодная» передняя детекторная электроника 1/2 GaAs-чипа ВВ-96В (MP1) (8 предусилителей и 2 сумматора)



22/05/2024 Семинар ЛЯП



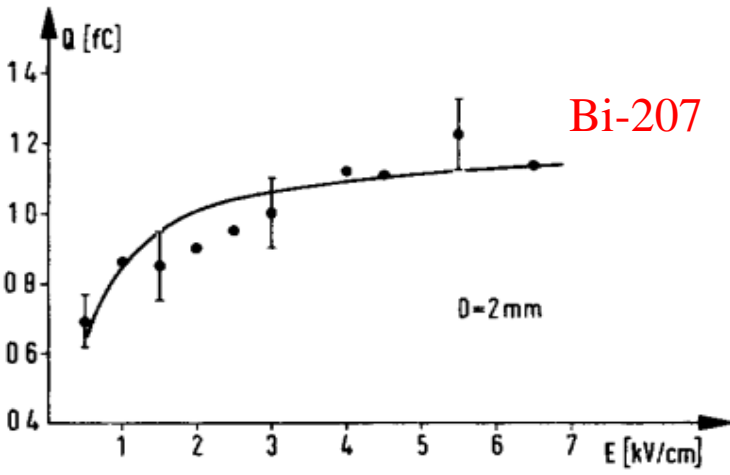
#### «Тёплая» электроника на криостате (коррекция АЧХ, АЦП, опт. передача)



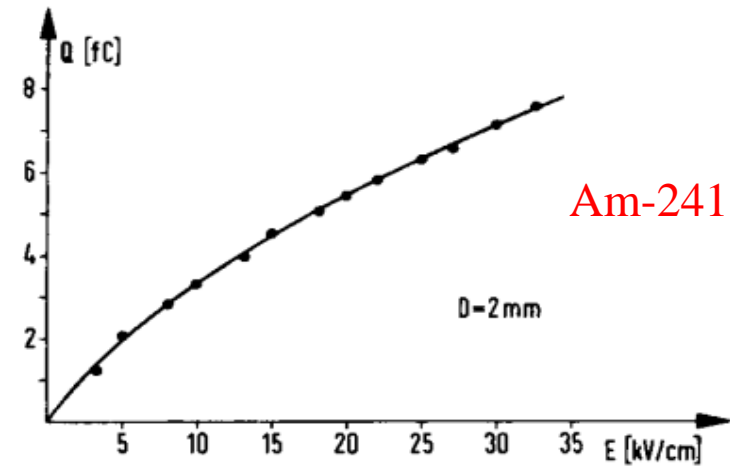
#### Система н/в питания

# 3. Ионизация в жидком аргоне.

Колоннообразная модель.

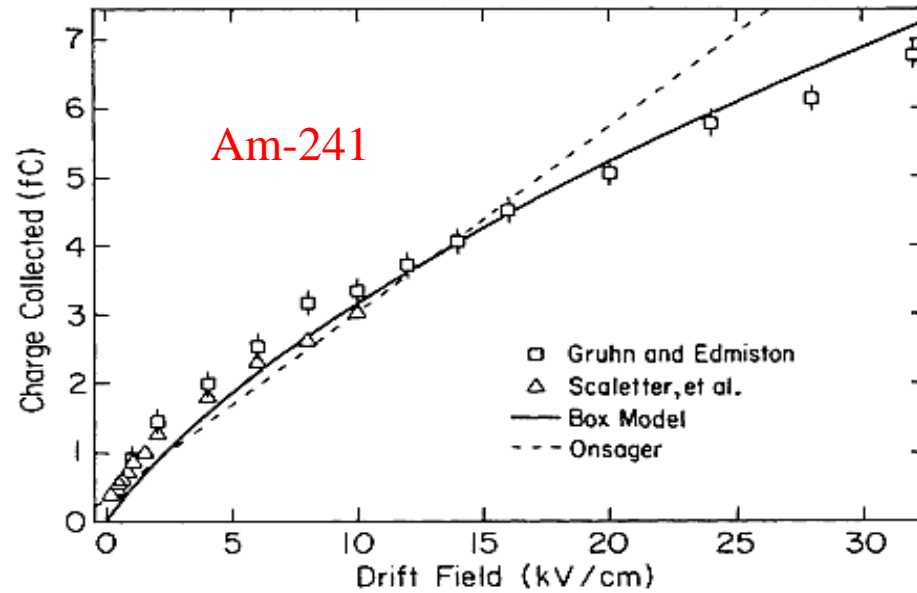


$^{207}\text{Bi}$



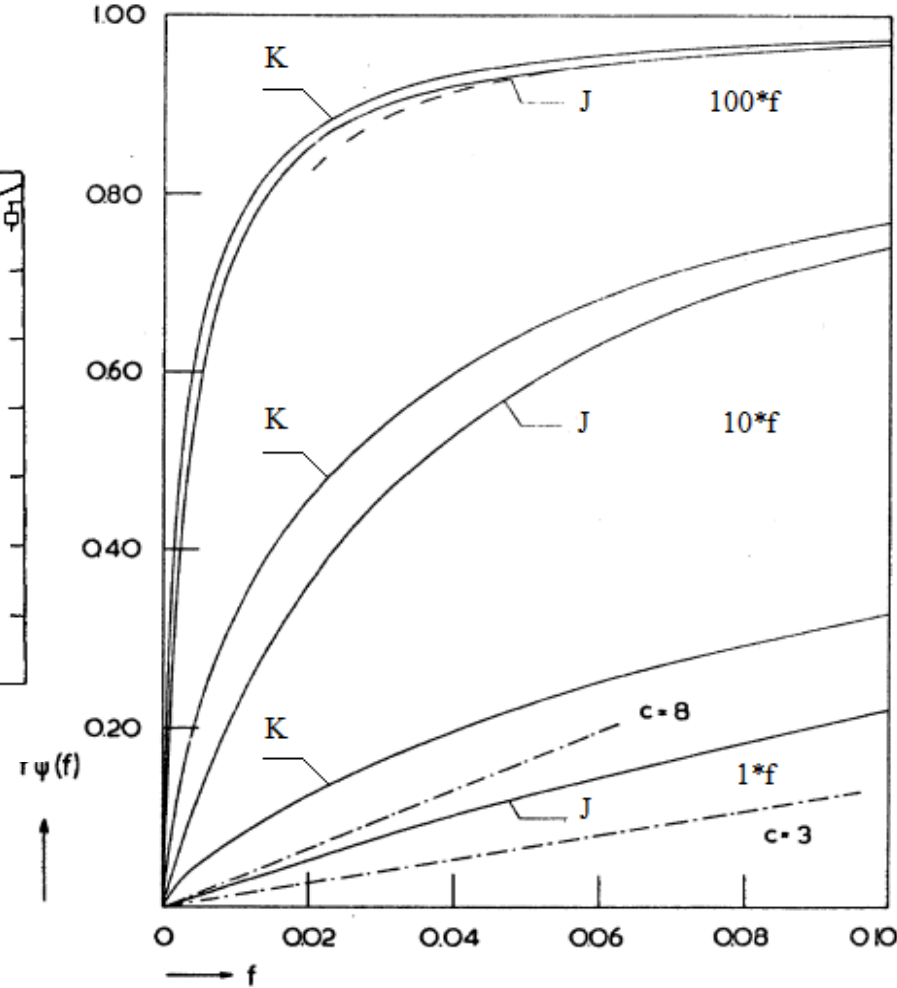
$^{241}\text{Am}$

«Бокс»-модель.



$^{241}\text{Am}$

Решение Х. Крамерса (для  $\alpha$ -частиц).



### 3. Ионизация в жидком аргоне. Время дрейфа.

Поправка времени дрейфа за счёт определение скорости дрейфа с учётом температуры и напряжённости электрического поля (добавление диффузии Калинина-Потребенникова к «бокс»-модели Томаса-Аймела):

$$v_{drift}^{model}(T, E) = (1 + P_1(T - T_0)) \left( P_3 E \ln \left( 1 + \frac{P_4}{E} \right) + P_5 E^{P_6} \right) + P_2(T - T_0)$$

$P_1$ - $P_6$  – коэффициенты,  $T_0=90.371$  °K (const),  $T=89.55$  °K .

$T_0$	90.371 °K (const)
$P_1$	- 0.01481 ± 0.00095 °K <sup>-1</sup>
$P_2$	- 0.0075 ± 0.0028 °K <sup>-1</sup>
$P_3$	0.141 ± 0.023 (см/кВ)
$P_4$	12.4 ± 2.7 (кВ/см)
$P_5$	1.627 ± 0.078 (кВ/см) <sup>-P6</sup>
$P_6$	0.317 ± 0.021

$$t_{drift} = \frac{d_{HEC}}{v_{drift}^{model}} = 450 \text{ нс при HV}=1.8 \text{ кВ}$$

*A.M. Kalinin, Yu.K. Potrebennikov et al., Temperature and Electric Field Strength Dependence of Electron Drift Velocity in Liquid Argon, ATLAS Internal Note LARG-No-058, 1996, CERN, Geneva.*

*W. Walkowiak, Drift Velocity of Free Electrons in Liquid Argon, ATL-LARG-99-008, 1999, CERN, Geneva.*

## 4. Загрязнение кислородом жидкого аргона. Материалы и компоненты.

Элементы НЕС-калориметра в жидком аргоне  
при  $(1.3 \pm 0.2) 10^{16}$ нейтрон  $\text{МэВ}^{-1} \text{см}^{-2}$ ,  $(107 \pm 11)$ кГрей:

- Honeycomb-коврик, 2 листа: полиимидная смола
  - EST-электрод, 1 лист: полиимид, углерод
  - PAD-электрод, 1/2листа: полиимид, углерод, медь
  - плата передней электроники: стеклотекстолит FR4
  - 4 GaAs-чипа: золото, керамика, арсенид галлия
  - панельки типа DIP-16: пластик чёрный
  - кабели коаксиальные: медь, полиимидная изоляция
  - кабели питания: медь, полиимидная изоляция
  - ламель цепей калибровки «Strip Line»: медь, полиимид
  - фурнитура (винты): пластик белый 234  $\text{см}^3$
  
  - кабельные стяжки (tefzel): пластик белый 5.4  $\text{см}^3$
  
  - скользящие трёхслойные контакты (permaglide) из композита: медь, олово, свинец (бронза) политетрафлуорэтилен (polytetrafluoreethylene) 7.0  $\text{см}^3$
- Элементы ЕМЕС-калориметра в жидком аргоне:  
при  $(1.0 \pm 0.1) 10^{16}$ нейтрон  $\text{МэВ}^{-1} \text{см}^{-2}$ ,  $(96 \pm 10)$ кГрей:
- РЕЕК-волокно: пластик белый, диаметр 0.375мм, длина 75м 282  $\text{см}^3$
  - терморезисторы RT-100, 5шт : платина 2.0  $\text{см}^3$

Элементы FСAL- калориметра в жидком аргоне  
при  $(0.7 \pm 0.1) 10^{16}$ нейтрон  $\text{МэВ}^{-1} \text{см}^{-2}$ ,  $(67 \pm 7)$ кГрей:

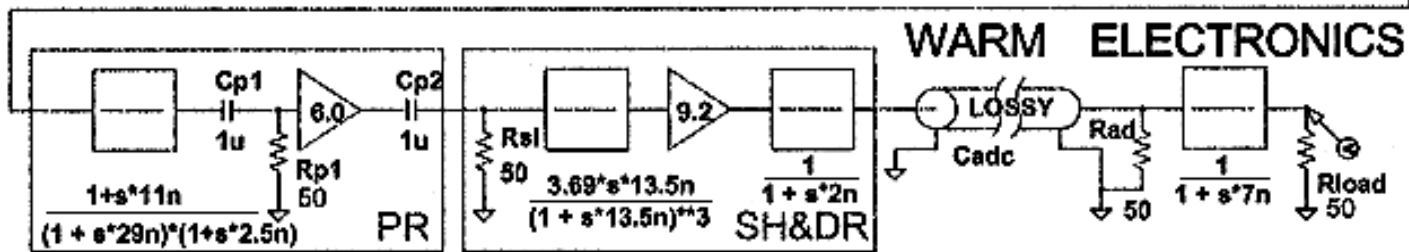
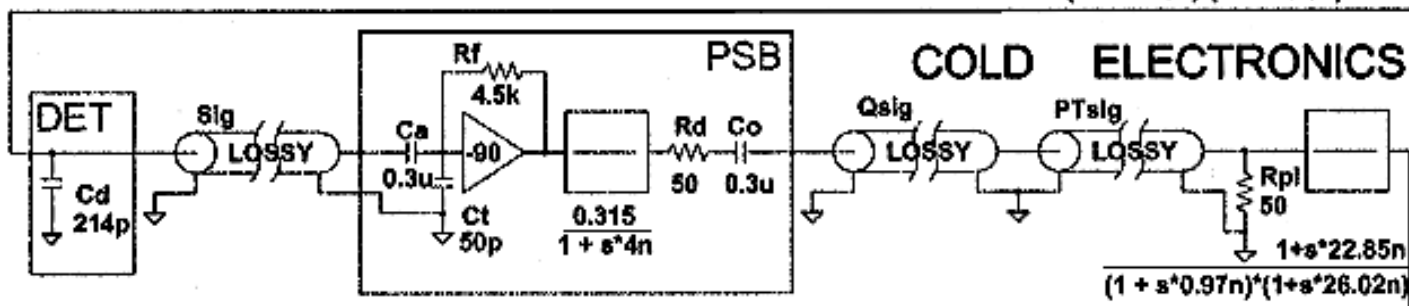
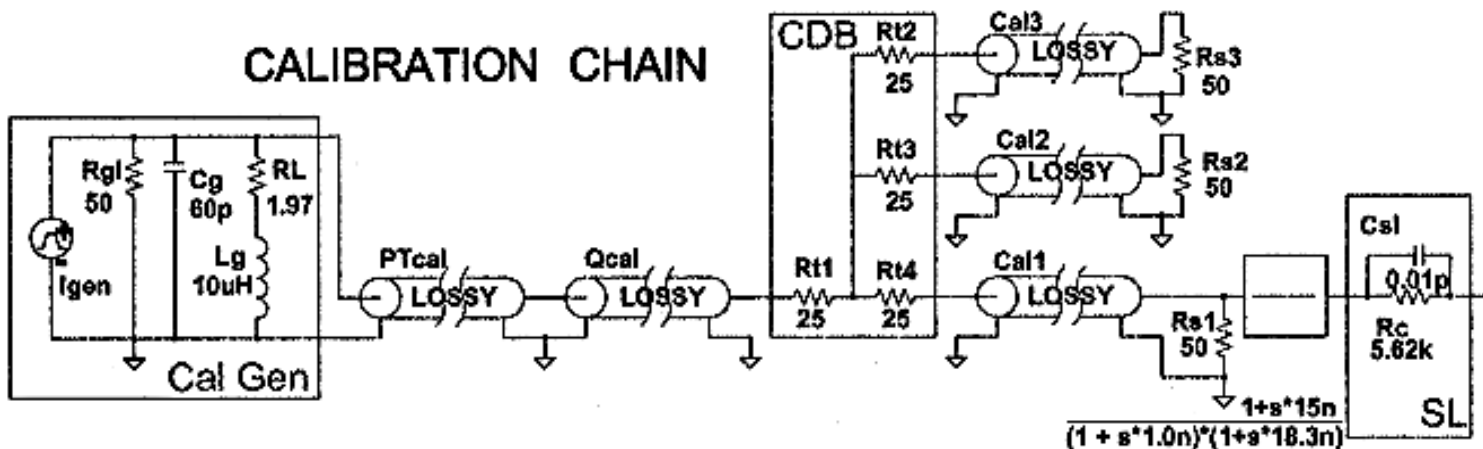
- электроды: стеклотекстолит типа PREPREG (epoxy laminate) площадью 0.22  $\text{м}^2$ , толщиной 1.5 мм 330  $\text{см}^3$
  
- обожжённые слитки: вольфрам, магний 234  $\text{см}^3$
  
- электроды (9 кусков): стеклотекстолит типа FR4 200  $\text{см}^3$
- кабели сигнальные: полиамид (картон-NPP), длина 30м
- одиночные соединители (2 типа, всего 173комплектов)
  
- плата электроники: стеклотекстолит типа FR4
- разъёмы, 2шт: типа D-SUB 100  $\text{см}^3$
  
- компоненты передней электроники 38  $\text{см}^3$ :
- смд-резисторы, 254 шт: металлокерамика
- смд-конденсаторы, 252 шт: металлокерамика
- смд-трансформаторы, 47 шт: медь, пластик (корпус)
  
- электроника системы монитора загрязнения 13  $\text{см}^3$ :
- смд-резисторы -72 шт,
- смд-конденсаторы -75шт
- диски корпуса бшт (пластик) и в/в конденсаторов: -5шт



# 6. Калибровка модулей от генератора.

Получение аналитической функции ионизационного сигнала с АЦП (в мВ) и перевод её во входной ток (нА) (постоянная времени предварительного формирователя и формирователя).

CALIBRATION CHAIN



Chain component	Parameters	Values	Transfer function
Generator	Delay time	$\tau_d = 350 \text{ ns}$	$\frac{\alpha + s\tau_d}{s(1 + s\tau_d)}$
	Step fraction	$\alpha = 0.07$	
Cable1 (calibr.)	Attenuation	$\alpha_c = 0.905$	$\frac{a_c(1 + s\tau_{zc})}{(1 + s\tau_{oc})(1 + s\tau_{pc})}$
	Zero	$\tau_{zc} = 18 \text{ ns}$	
	Pole 1	$\tau_{oc} = 1.2 \text{ ns}$	
	Pole 2	$\tau_{pc} = 21 \text{ ns}$	
Detector	Capacitance	$C_D = 20\text{-}400 \text{ pF}$	-
	Cable length	0.2-2m	-
Preamplifier	Drift time	$\tau_{dr} = 450 \text{ ns}$	-
	Input impedance	$R_a = 50 \text{ }\Omega$	$\frac{R_p}{(1 + s\tau_a)(1 + s\tau_{da})}$
	Integration	$\tau_a = 4\text{-}23 \text{ ns}$	
	Transimped.	$R_p = 0.75 \text{ k}\Omega$	
	Driver	$\tau_{da} = 4 \text{ ns}$	
	Cable2 (signal)	Attenuation	$\alpha_s = 0.965$
Zero	$\tau_{zs} = 24.5 \text{ ns}$		
Pole 1	$\tau_{os} = 1.2 \text{ ns}$		
Preshaper	Pole 2	$\tau_{ps} = 28.5 \text{ ns}$	$\frac{G_p(1 + s\tau_{pz})}{(1 + s\tau_i)(1 + s\tau_0)}$
	Gain	$G_p = 6.5$	
	Zero	$\tau_{pz} = 0\text{-}20 \text{ ns}$	
Shaper and Driver	Pole 1	$\tau_i = 29 \text{ ns}$	$\frac{G_{sd} \cdot 3.69s\tau_s}{(1 + s\tau_s)^3}$
	Pole 2	$\tau_0 = 2.5 \text{ ns}$	
	Gain	$G_{sd} = 9.2$	
Cable3 (from Driver to ADC)	Time	$\tau_s = 13.5 \text{ ns}$	$\frac{1}{(1 + s\tau_{df})(1 + s\tau_{ac})}$
	Pole 1	$\tau_{df} = 2 \text{ ns}$	
	Pole 2	$\tau_{ac} = 7 \text{ ns}$	