

Газонаполненные детекторы новейшего поколения

Представлены результаты работ по новейшим микроструктурным детекторам ИИ, в том числе собственные результаты 2019 г.

Приведены примеры возможного применения новейших детекторов на БАК и ПИК.

Часть I

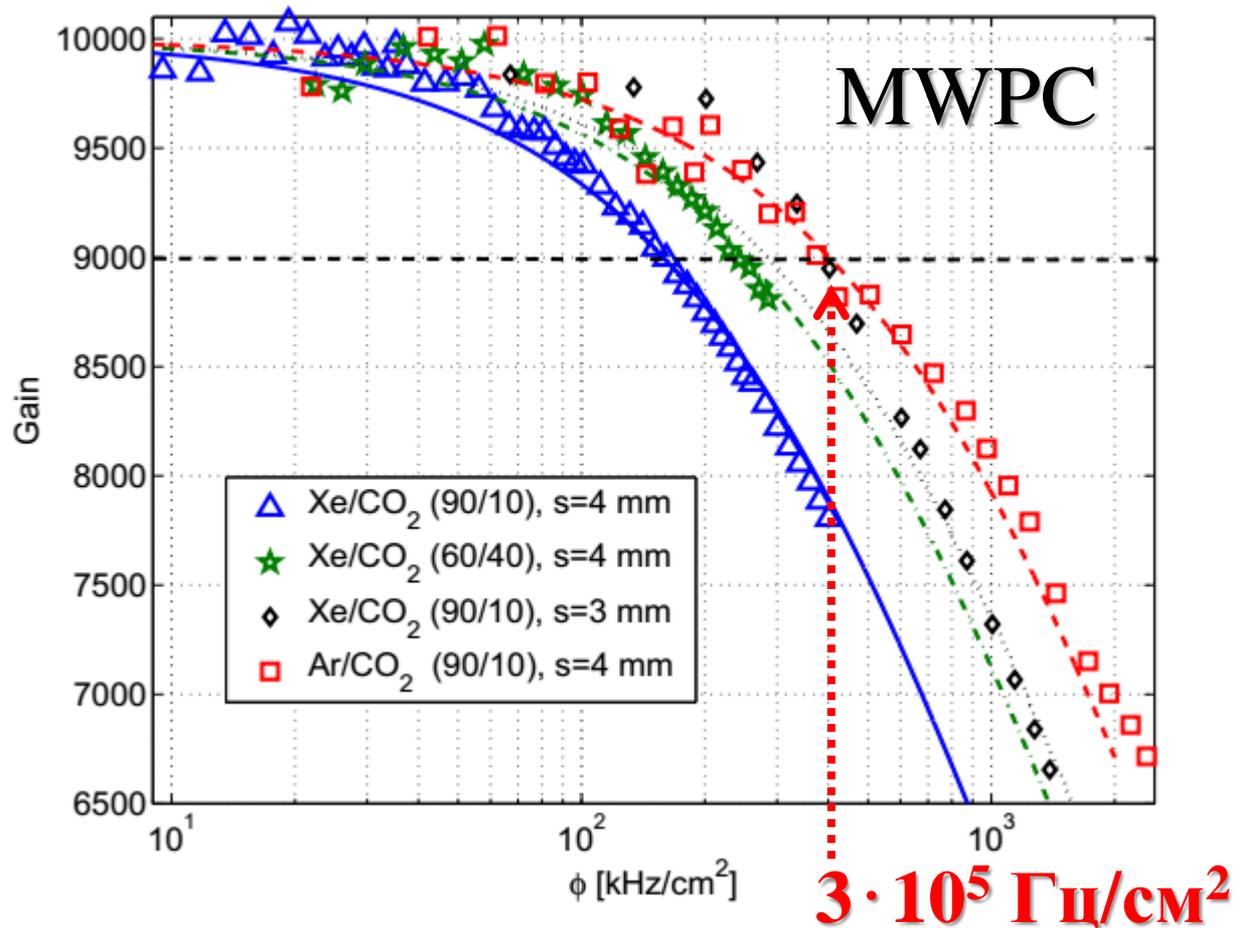
Колодезные и микроколодезные
электронные умножители
с резистивным анодом
– новейшее достижение MPGD,
на которое следует обратить особое
внимание

Детекторы, удостоенные Нобелевской премии

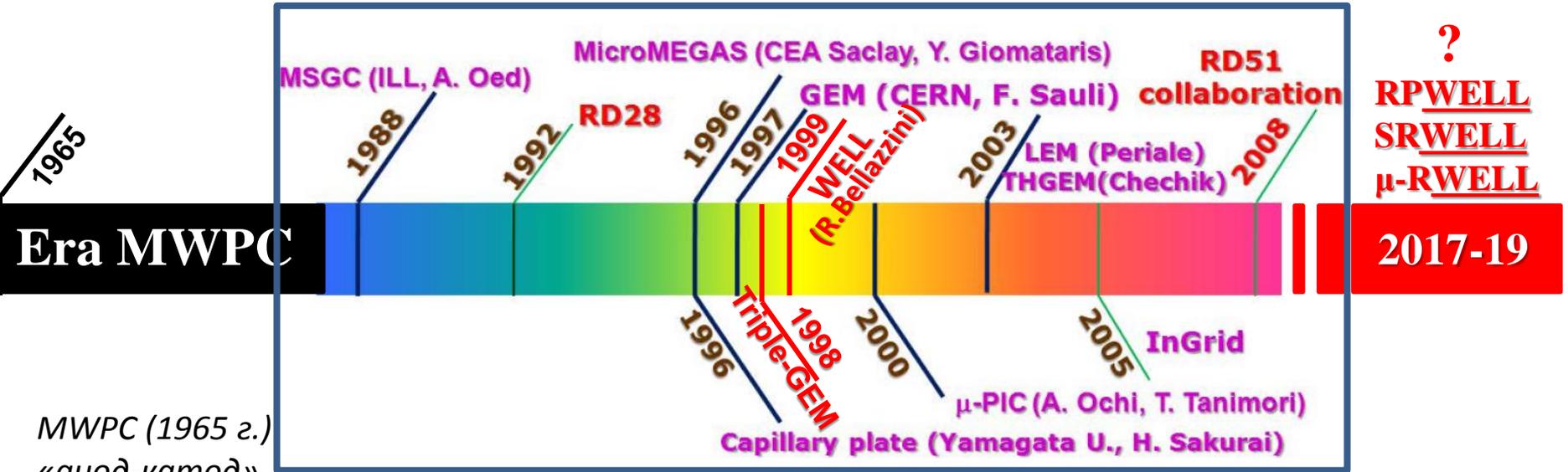
- [C.Wilson](#) в 1927 г. получил [Нобелевскую премию по физике](#) за изобретение к.В. Впоследствии уступила место пузырьковой камере
- [C.Powell](#) в 1950г. был награждён [Нобелевской премией](#) за разработку методики я. фотоэмульсии и открытие в 1947 г. пи-мезона с помощью этой методики
- [G.Charpak. Нобелевская премия 1992 г.](#) Многопроволочные камеры (MWPC), разработанные в 1968 г., CERN
- [...что-нибудь достойное появилось?](#)

Быстродействие MWPC определяет пространственный заряд положительных ионов, возникающий вокруг проволочек

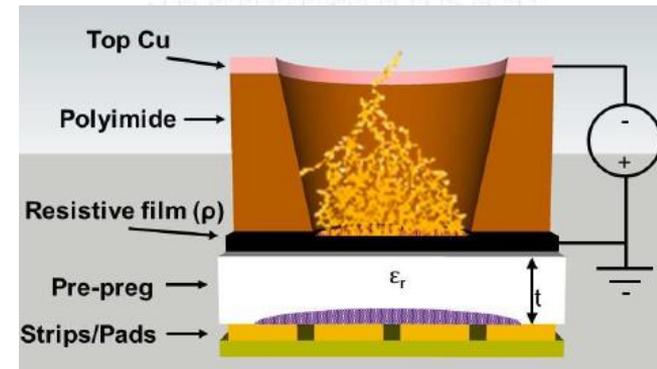
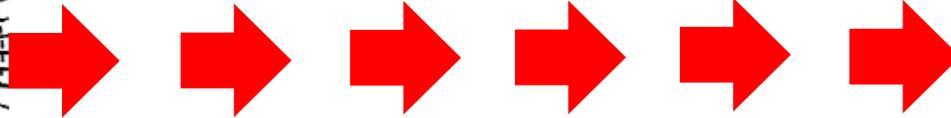
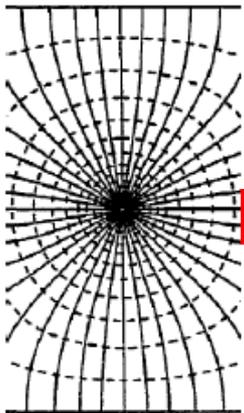
arXiv:0909.0242v1 Sep 2009



Micro-Pattern Gaseous Detectors



MWPC (1965 г.)
«анод-катод»
2.5 мм



R. Bellazzini, M. Bozzo, A. Brez, G. Gariano, L. Latronico, N. Lumb, A. Papanestis, G. Spandre, M.M. Massai, R. Raffo, M.A. Spezziga, **The WELL detector**, *Nucl. Instr. and Meth. A* 423, pp 125-134, 1999.

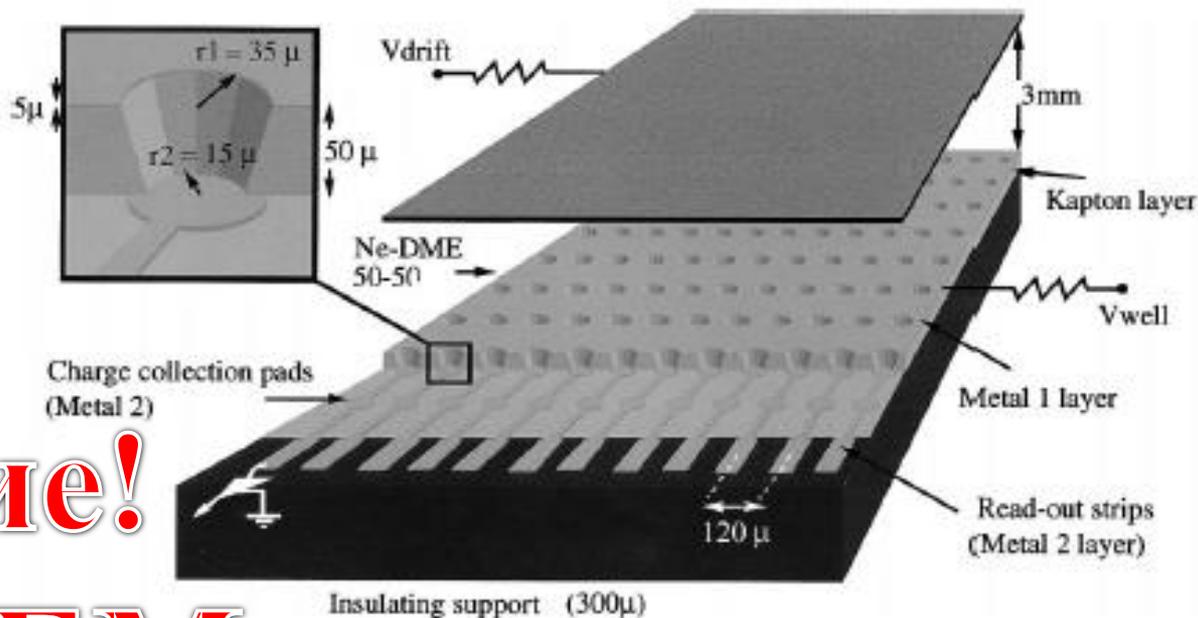
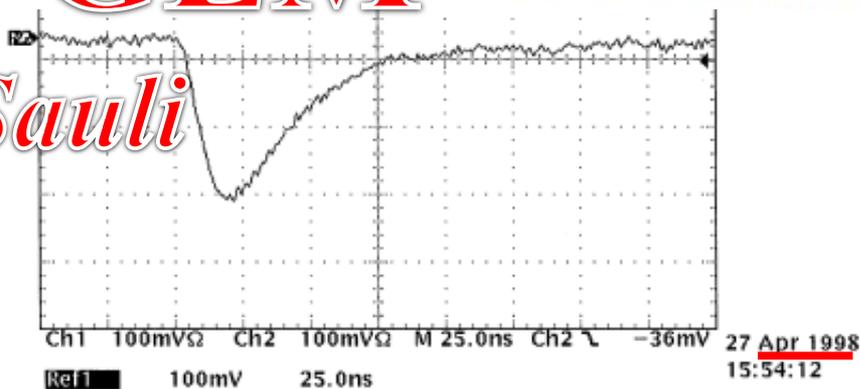


Fig. 1. Schematic diagram of a WELL detector.

Внимание!

Это не GEM

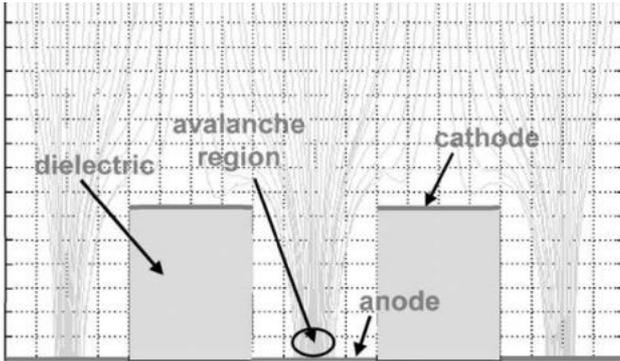
a la Sauli



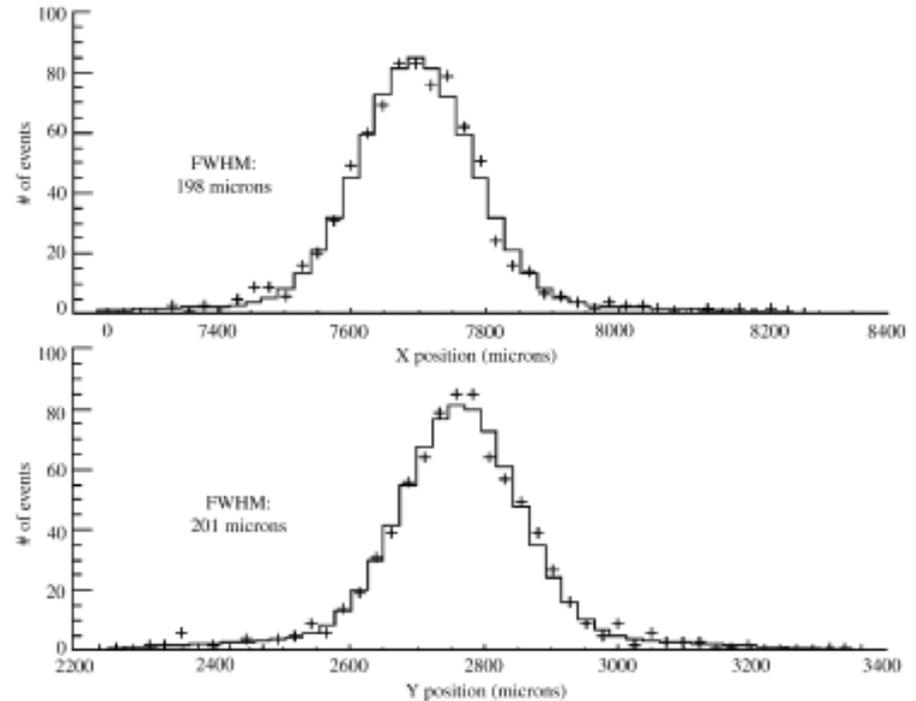
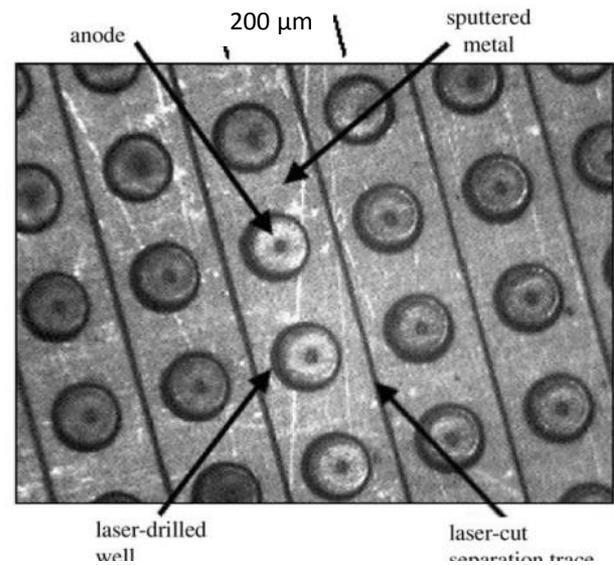
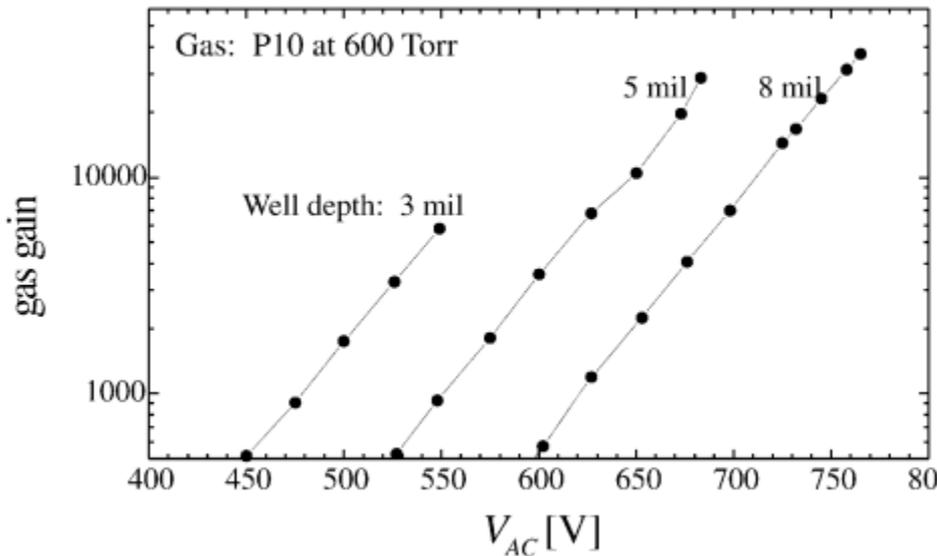
Large-area imaging micro-well detectors for high-energy astrophysics

P. Deines-Jones*, J.K. Black, S.D. Hunter, K. Jahoda, S.M. Owens

Laboratory for High Energy Physics, NASA/Goddard Space Flight Center, Code 661, Greenbelt, MD 20771, MD, USA



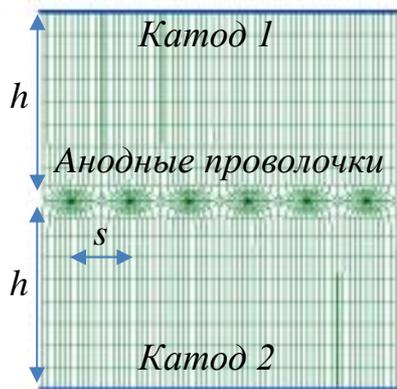
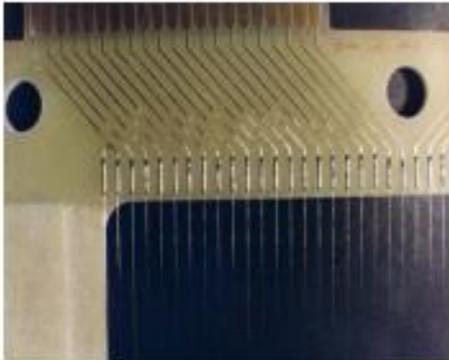
R. Bellazzini, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 423 (1999) 125.



Все началось с MSGC...

Быстродействие увеличено в 100 раз !

СЕРЬЕЗНЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ



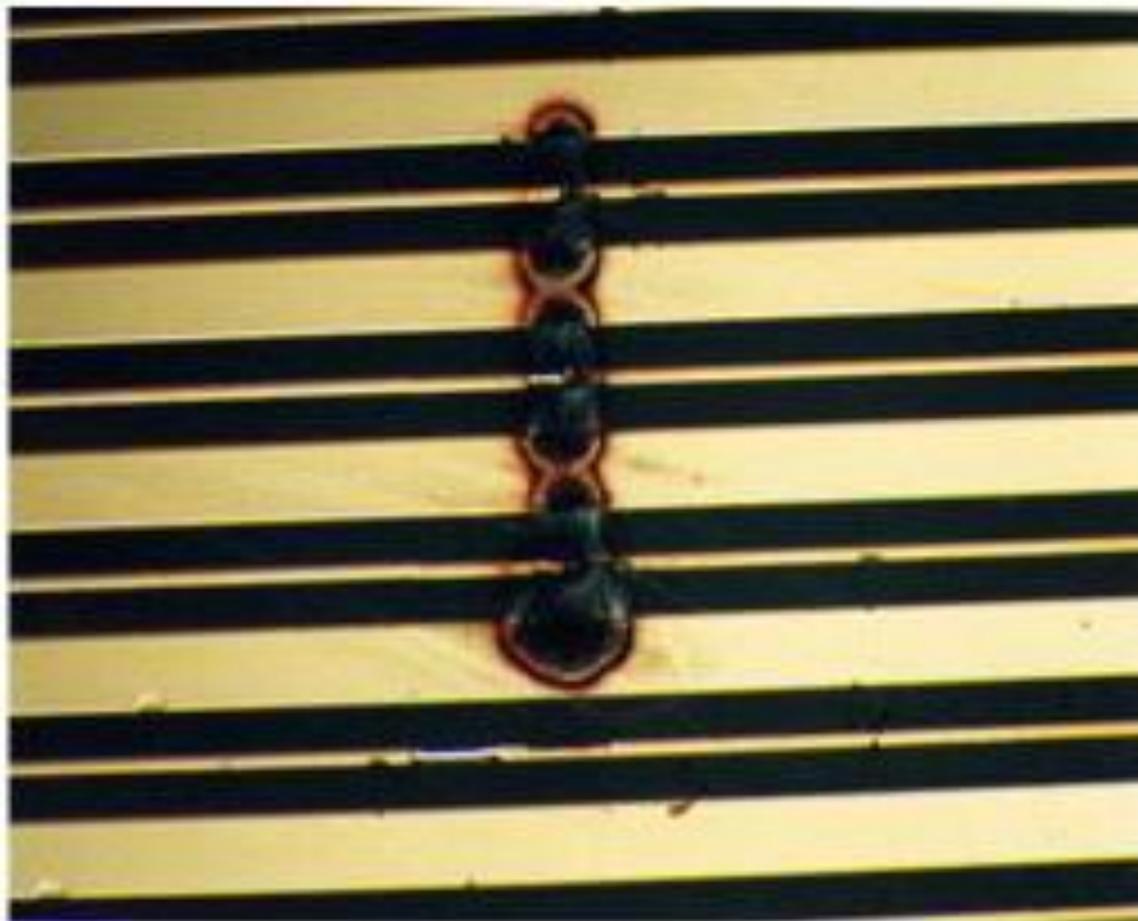
Typical distance between wires limited to 1 mm due to mechanical and electrostatic forces



First publi in
1988 (A. Oed)

A. Oed
Nucl. Instr. and Meth. A263 (1988) 351.
A.Kashchuk (PNPI)

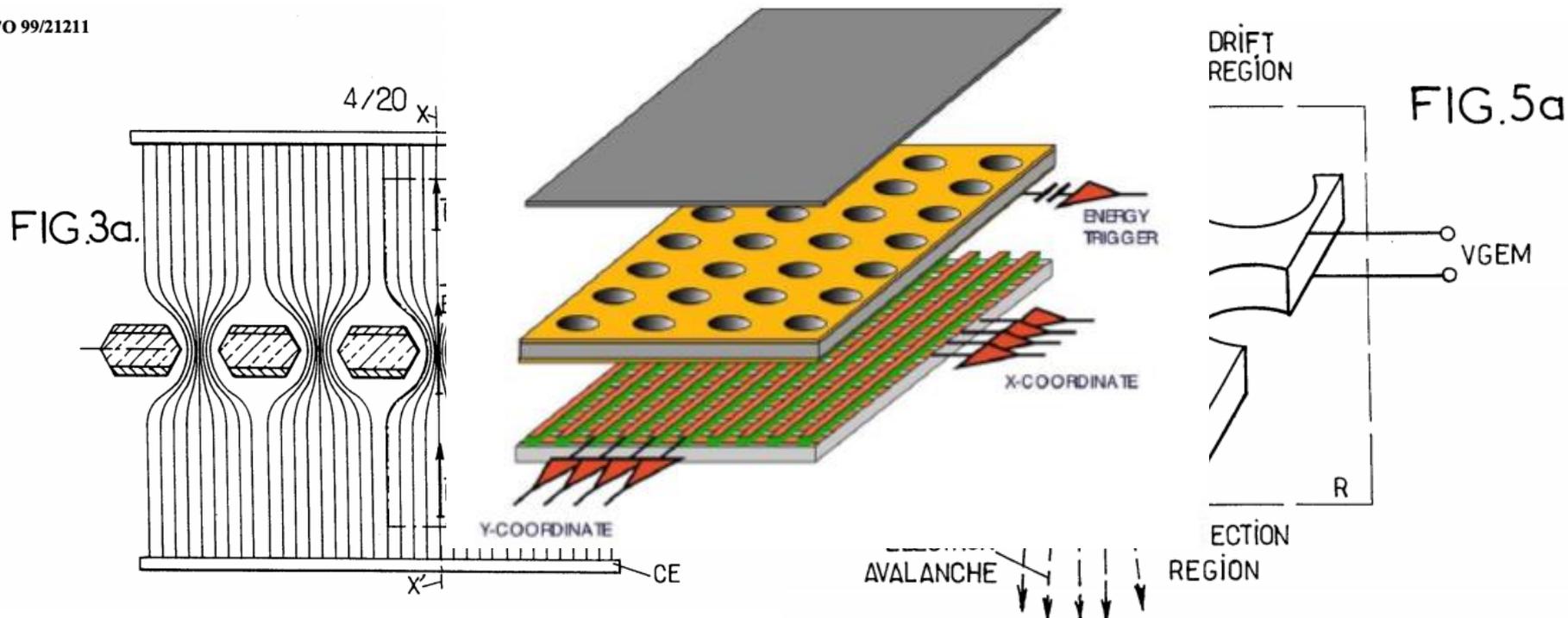
Проблема MSGC - **ПРОБОИ**



F.Sauli (1997)

Детектор со сквозными отверстиями и технология запатентованы многократно (CERN)

Radiation detector of very high performance F.Sauli (1997)

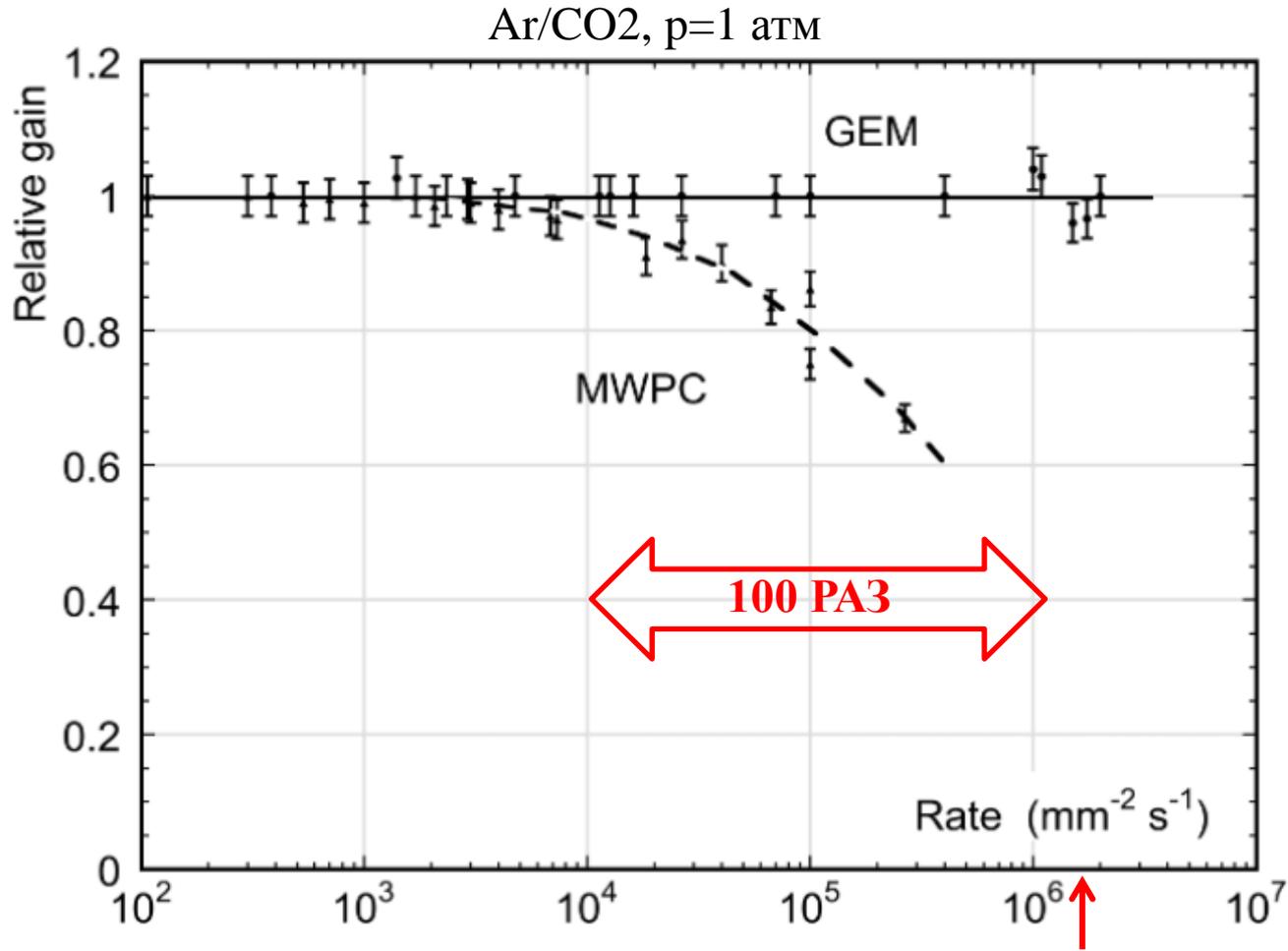


METHOD OF MANUFACTURING A GAS ELECTRON MULTIPLIER

R.de Oliveira (2008)

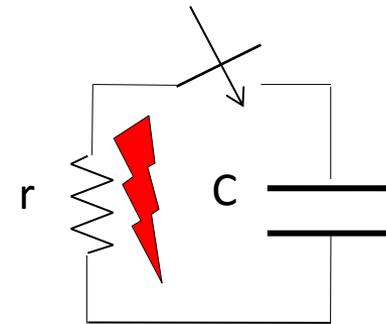
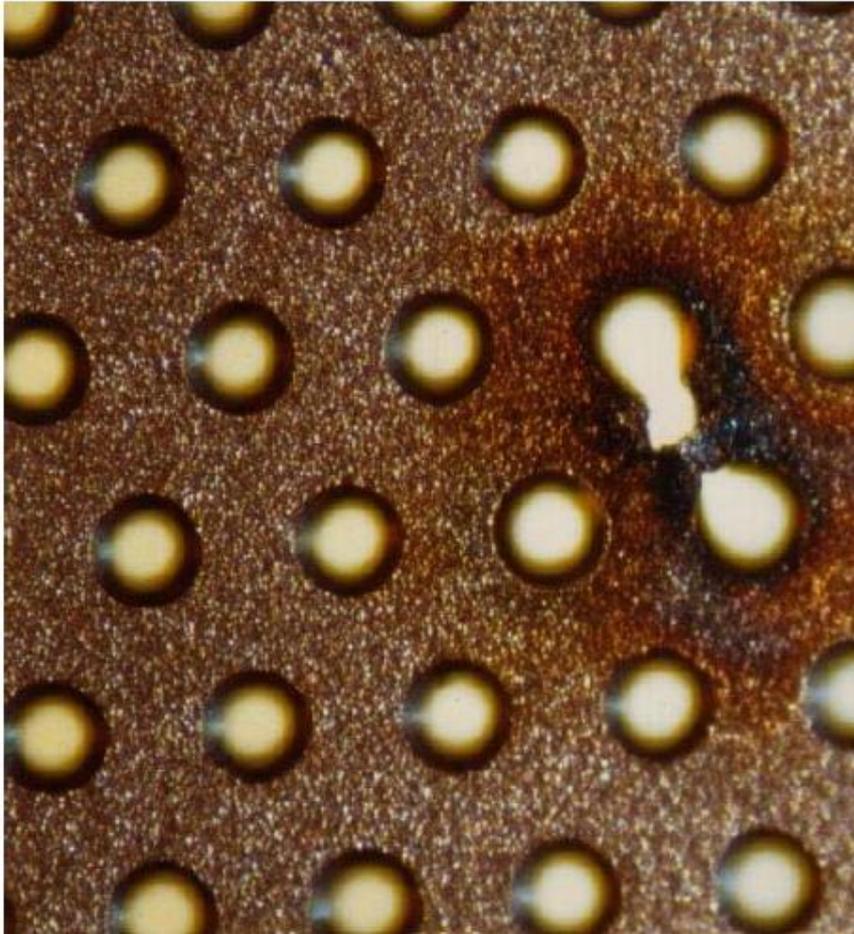
Быстродействие GEM не хуже MSGC

Размеры существенно увеличены - до метра, технология проще



10⁸ Гц/см²

Проблема ГЕМ - **ПРОБОИ**



Обязательное
секционирование площади !
Межэлектродная емкость
~8000 пФ
100×100 мм²
Как строить большие
детекторы из секций,
с внутренними секциями?

Вклад ПИЯФ в повышение надежности - впервые

B. Bochin, A. Kashchuk, V. Poliakov and A.A.Vorobyov, "X-ray tests of Double and Triple-GEM detectors for the LHCb inner tracker", LHCb note 98-068, 1998 [Online]. Available: <http://doc.cern.ch/archive/electronic/cern/others/LHB/public/lhcb-98-068.pdf>

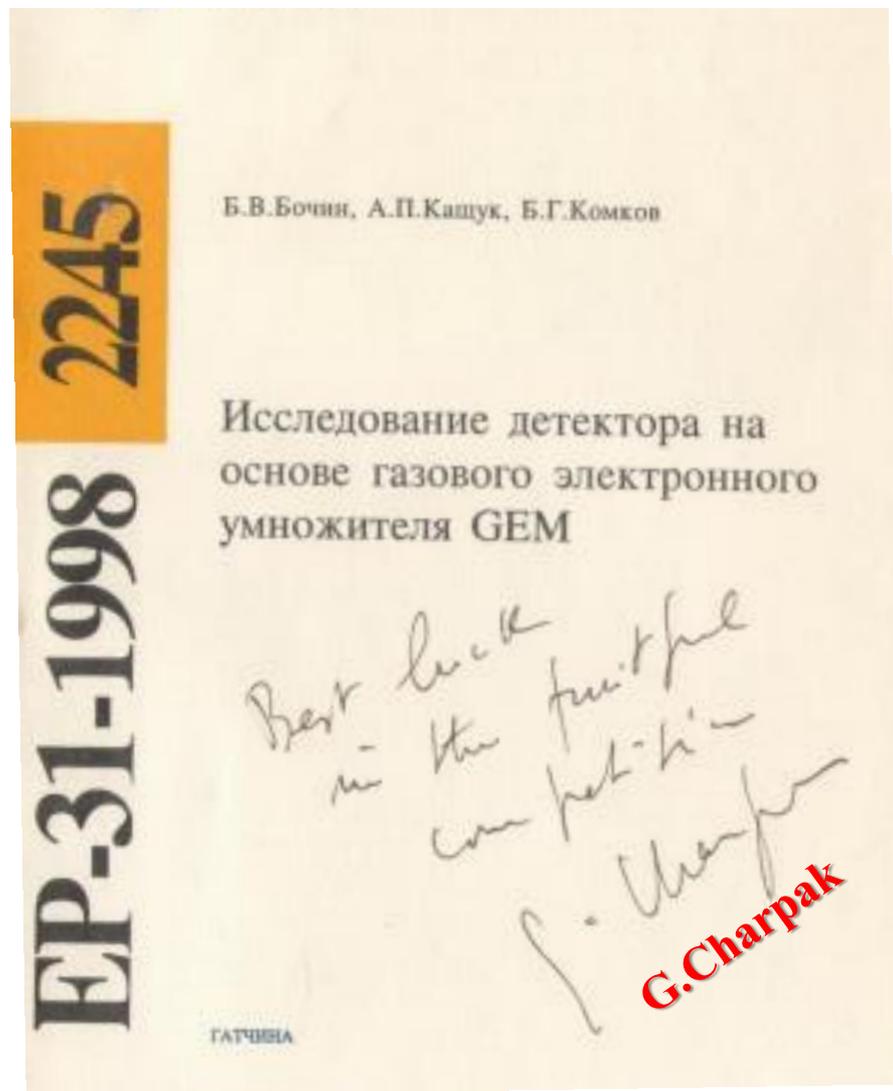
Triple-GEM

предложен
в ПИЯФ в 1998 г.

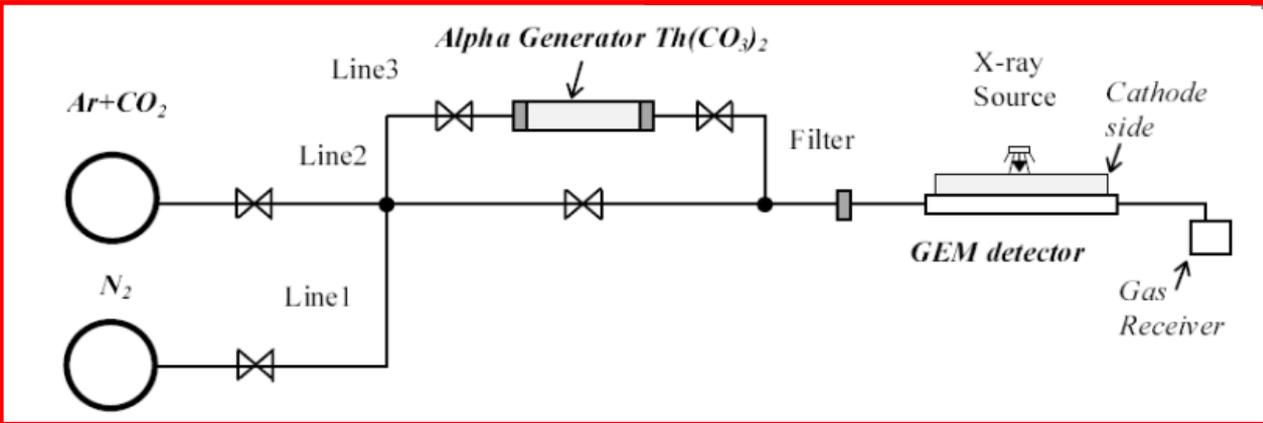
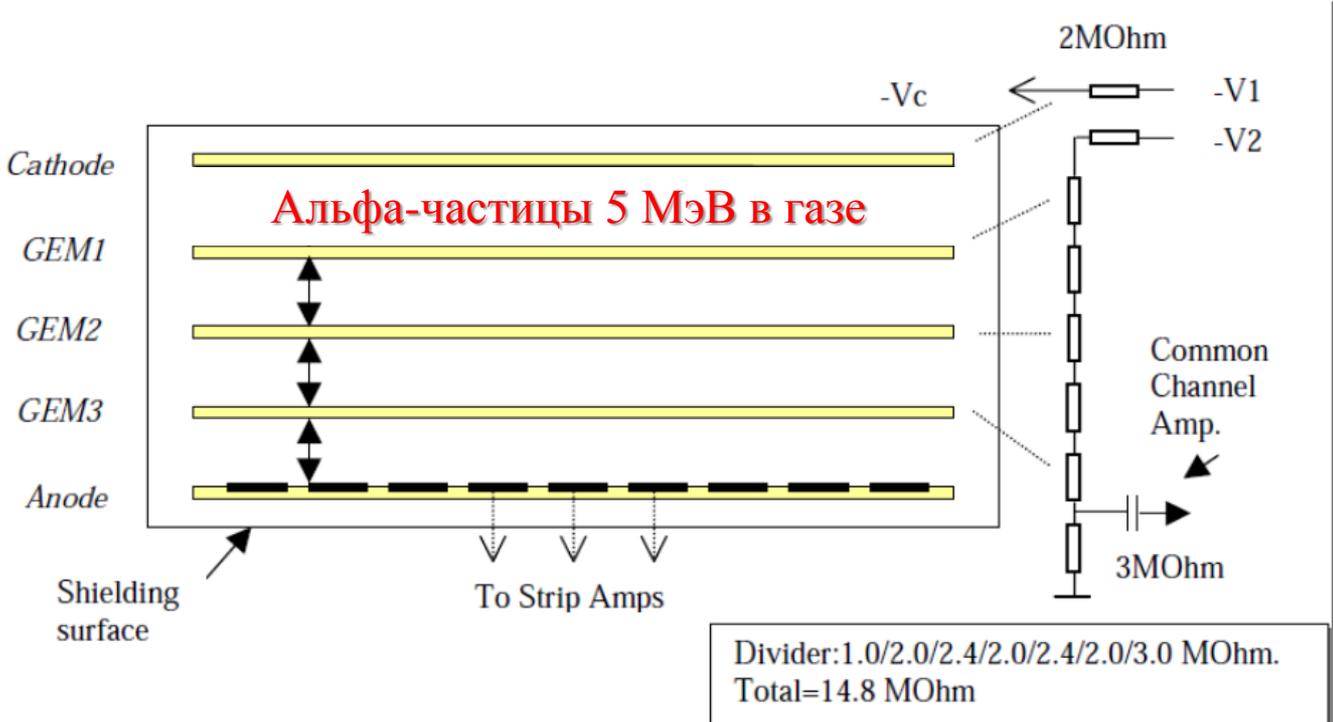
=====

F.Sauli et.al. NIM A470, 2001
(CERN)

аналогичный результат
получили спустя 3 года в 2001 г.



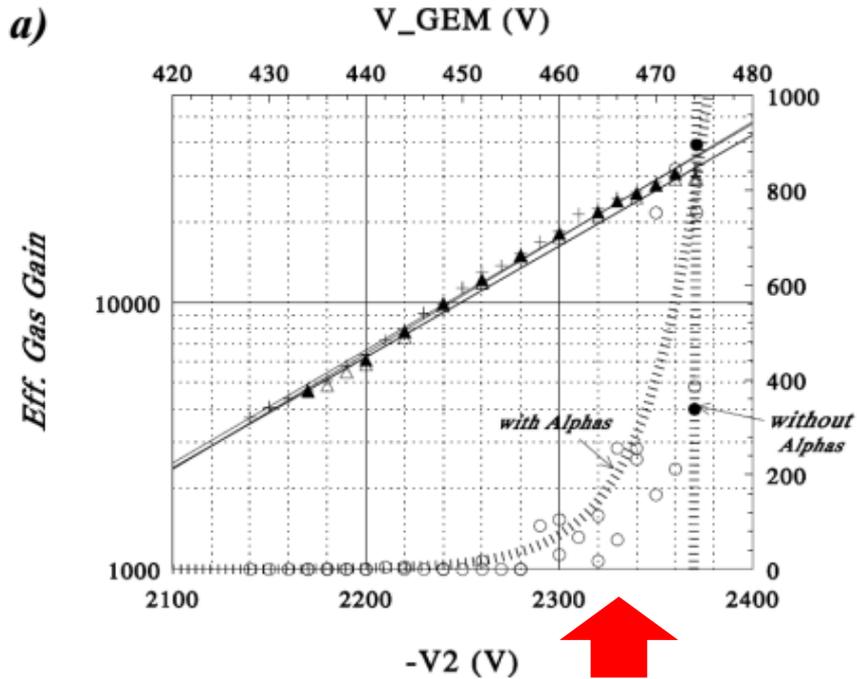
Вклад ПИЯФ в повышение надежности GEM



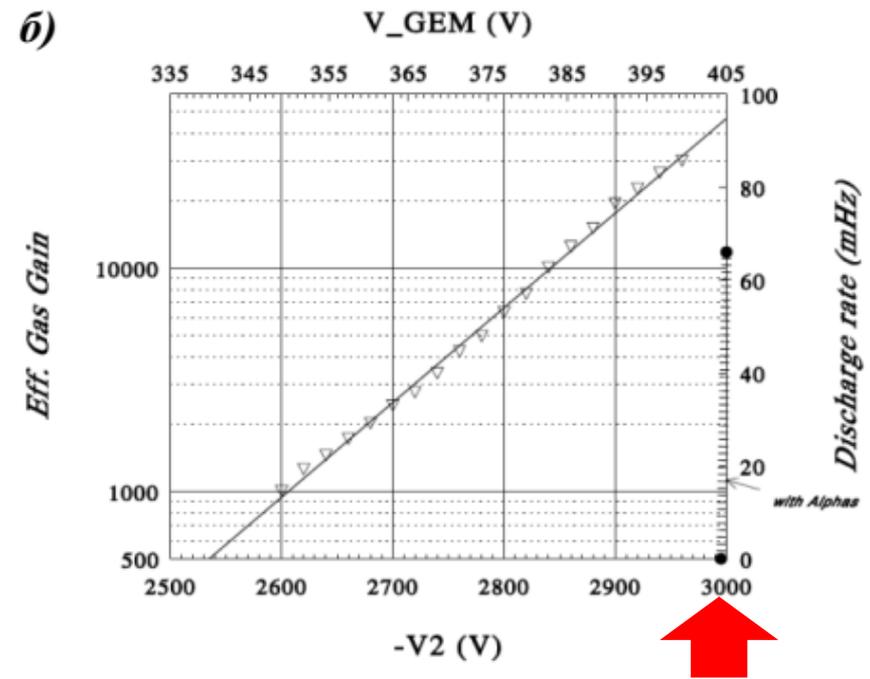
Впервые сделан важный вывод (1998 г.)

НАДЕЖНЫМ детектором для физики высоких энергий является **Triple-GEM**

Без альфа-частиц в газе нет пробоев в обеих структурах.



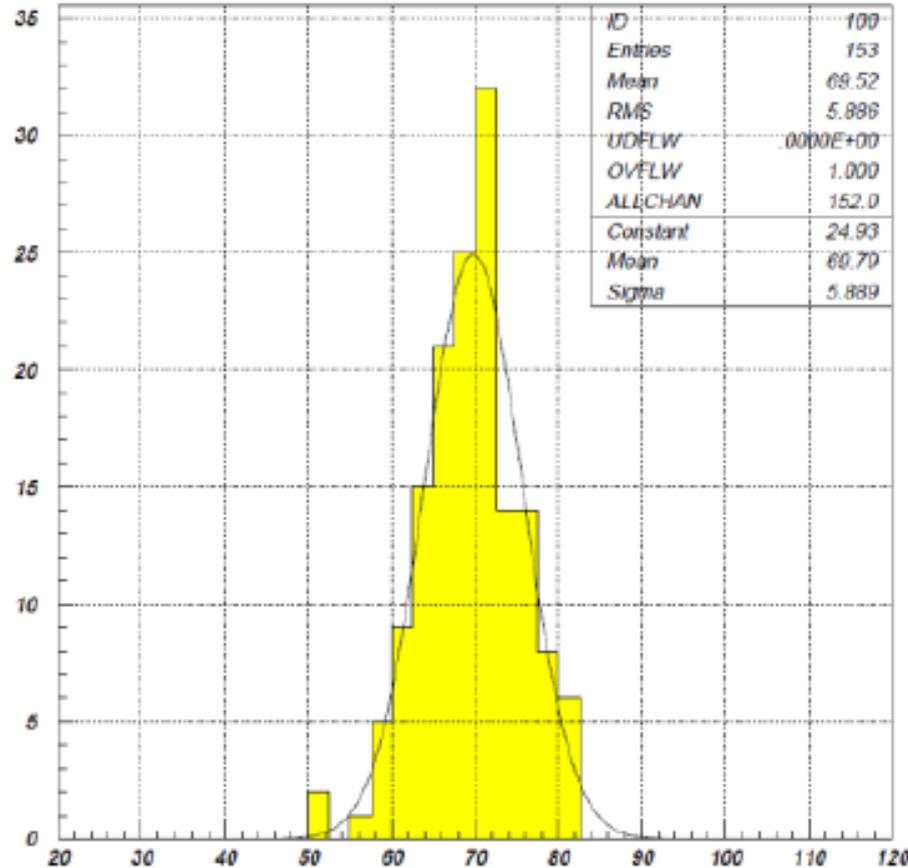
Double-GEM



Triple-GEM

Впервые в 1999 г. получен лучший результат:
временное разрешение $\sigma=5.9$ нс (F.Sauli $\sigma=12$ нс)

В 1999 году на пучке π мезонов с энергией 350 МэВ в PSI



Ar(70%)CO₂(30%)

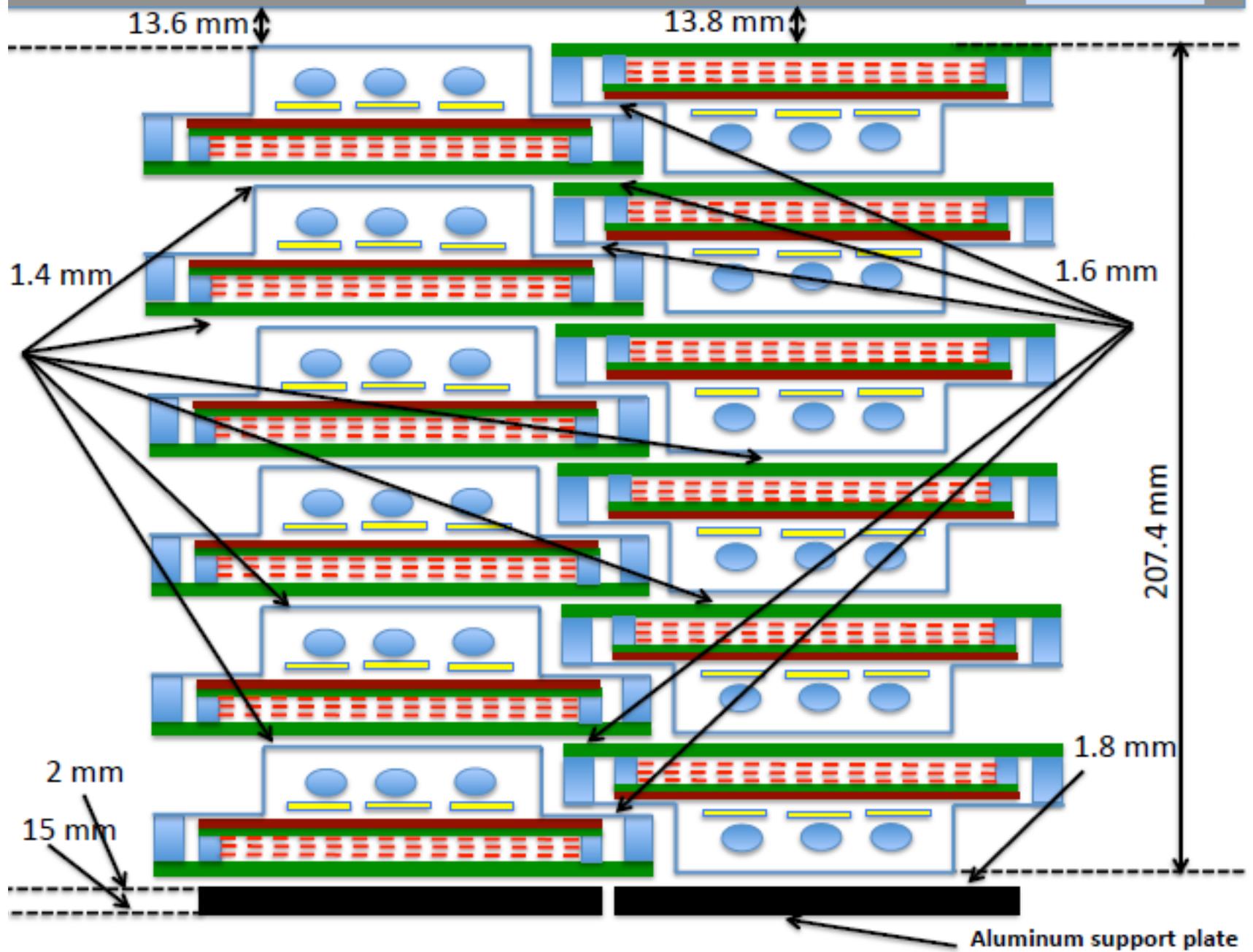
ТРИУМФ? 20 лет спустя

HL-LHC

About 1000m² of GEM foils for stations 1 and 2 of CMS muon detector
216 triple GEM detectors

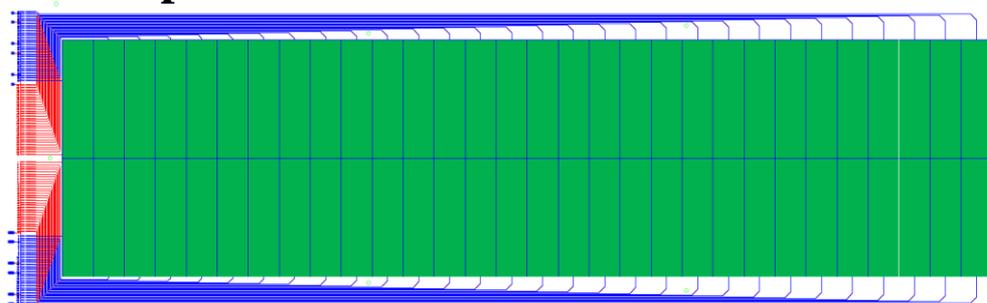
| Station | Nbr of modules | Module area (containing rectangle) | Total Nbr of modules (w/o spares) | Total GEM foil area (3ple GEMs) | Manufacturing plan |
|---------|-----------------------------------|--|---|------------------------------------|--|
| GE1/1 | 18x2x2=72 | ~0.43m ² (440x990) | 72 | 0.43x72x3 = 93m ² | Prototypes 2013+2014 Completion 2016+1017 |
| GE2/1 | 36x2=72 (long) 36x2=72 (short) | ~2.4m ² (1251x1911) ~1.6m ² (1251x1281) | 144 | (2.4+1.6)x72x3 = 864m ² | Prototypes 2013+2014 Completion 2016+1017 |

Nose support



USA, 2013

Triple-GEM $1.5 \times 0.5 \text{ m}^2$

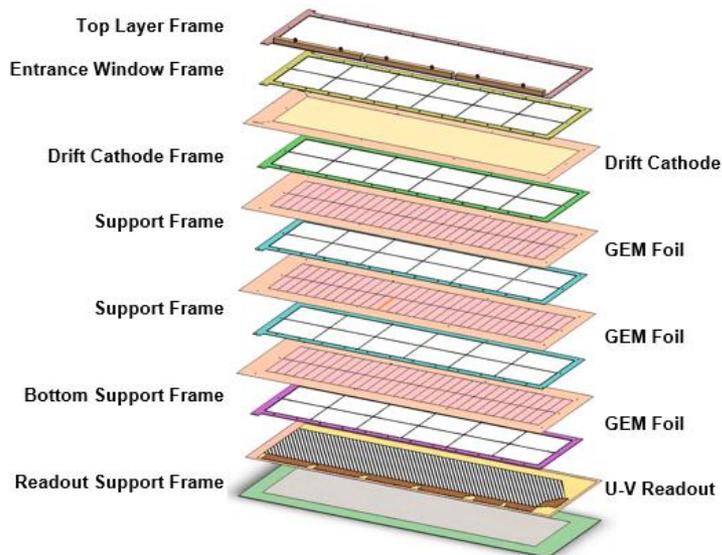


GEM foil:

- ⇒ Segmentation on both side unlike previous large GEM chambers
- ⇒ A short sector during operation **would not make the whole layer inoperable** ⇒ but only dead sector
- ⇒ Limited voltage drop in the divider at high particle rate

GEM support frame design:

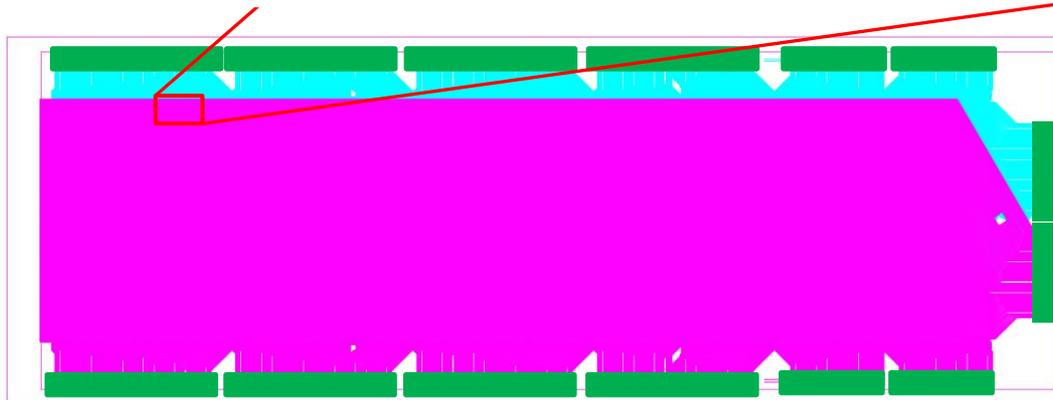
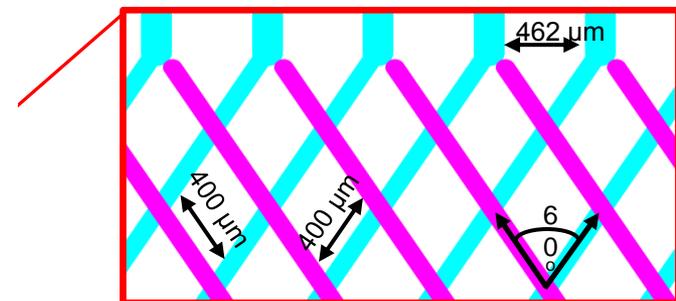
- ⇒ 500 μm spacer grid to provide uniform gap while minimizes dead area.
- ⇒ Designed with a wide outer frame for added rigidity and support when fully assembled.



Exploded view of chamber

U-V strip readout design:

- ⇒ U and V pitch of 400 μm , Vertical pitch: 462 μm
- ⇒ top (U-) strip: 80 μm
- ⇒ bottom strips: 350 μm
- ⇒ About 7k e- channels per layer

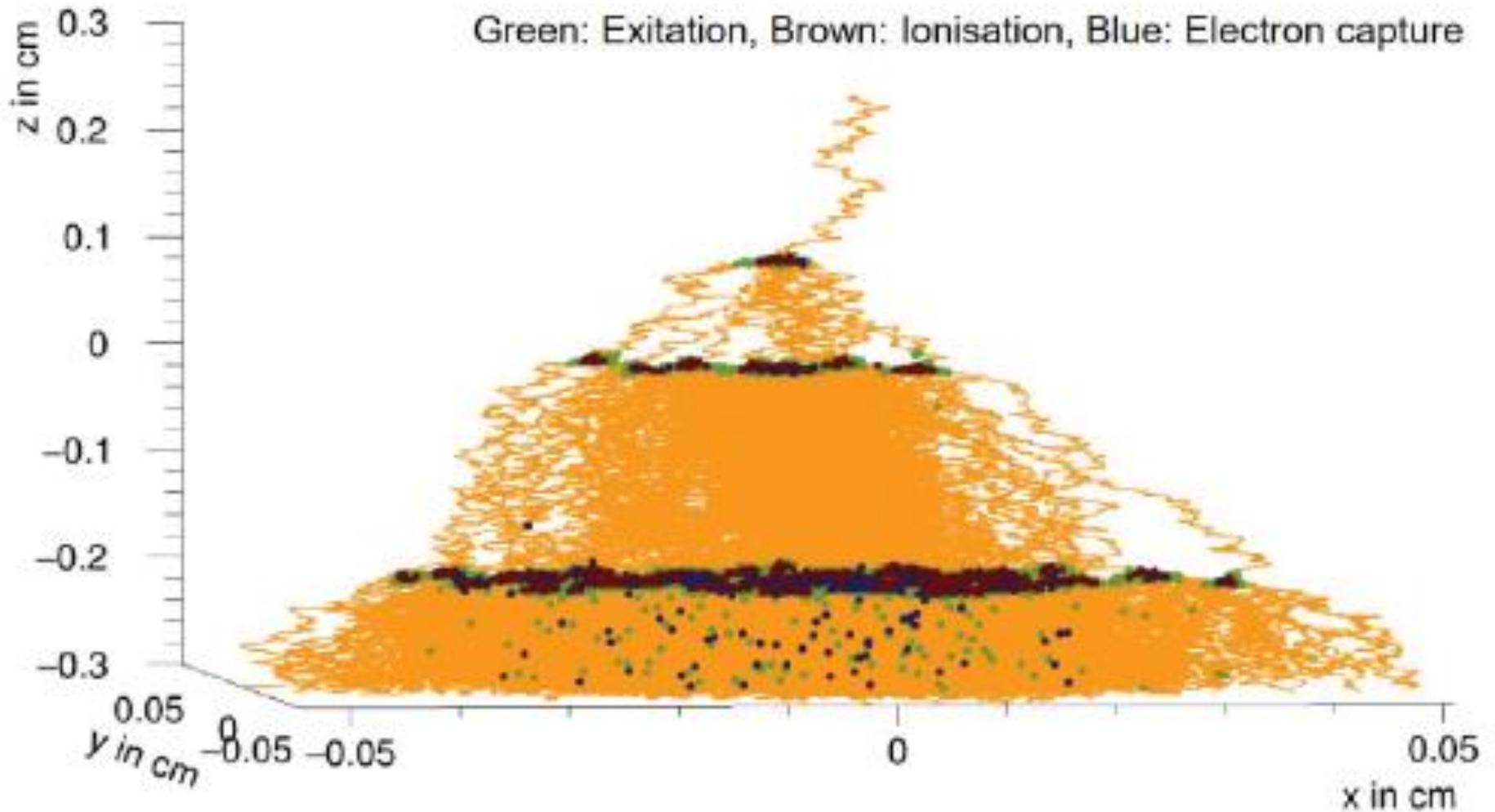


А является ли GEM

“Radiation detector of very high performance”

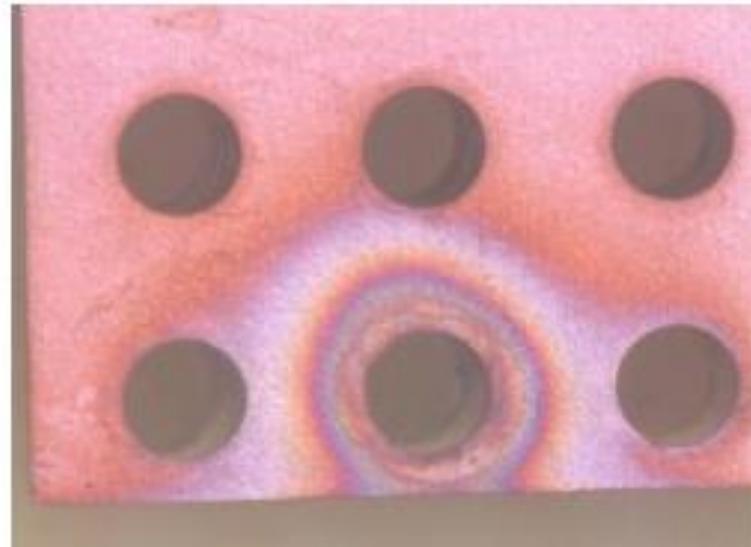
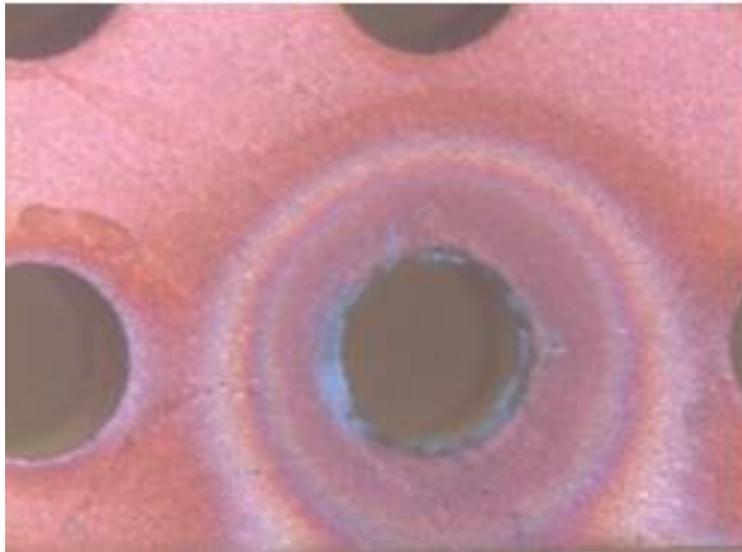
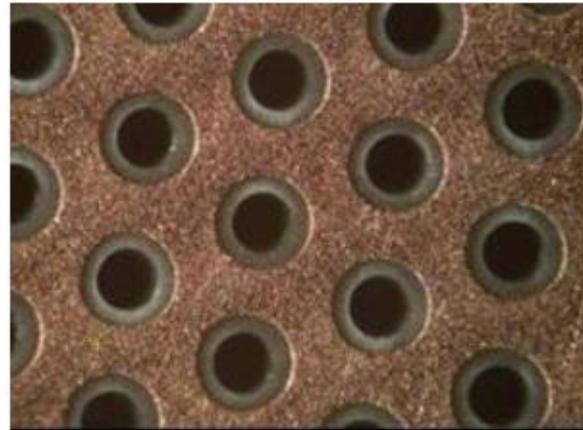
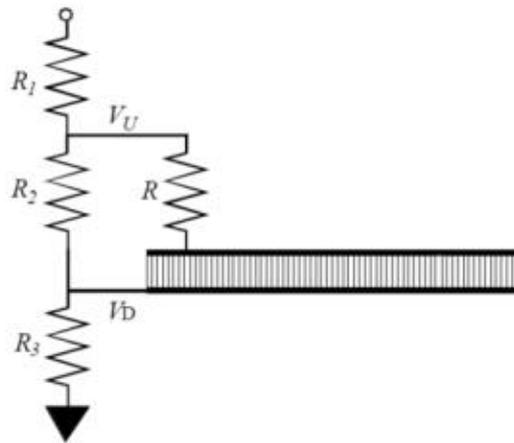
как заявляет F.Sauli

“Классический” GEM *a la Sauli*



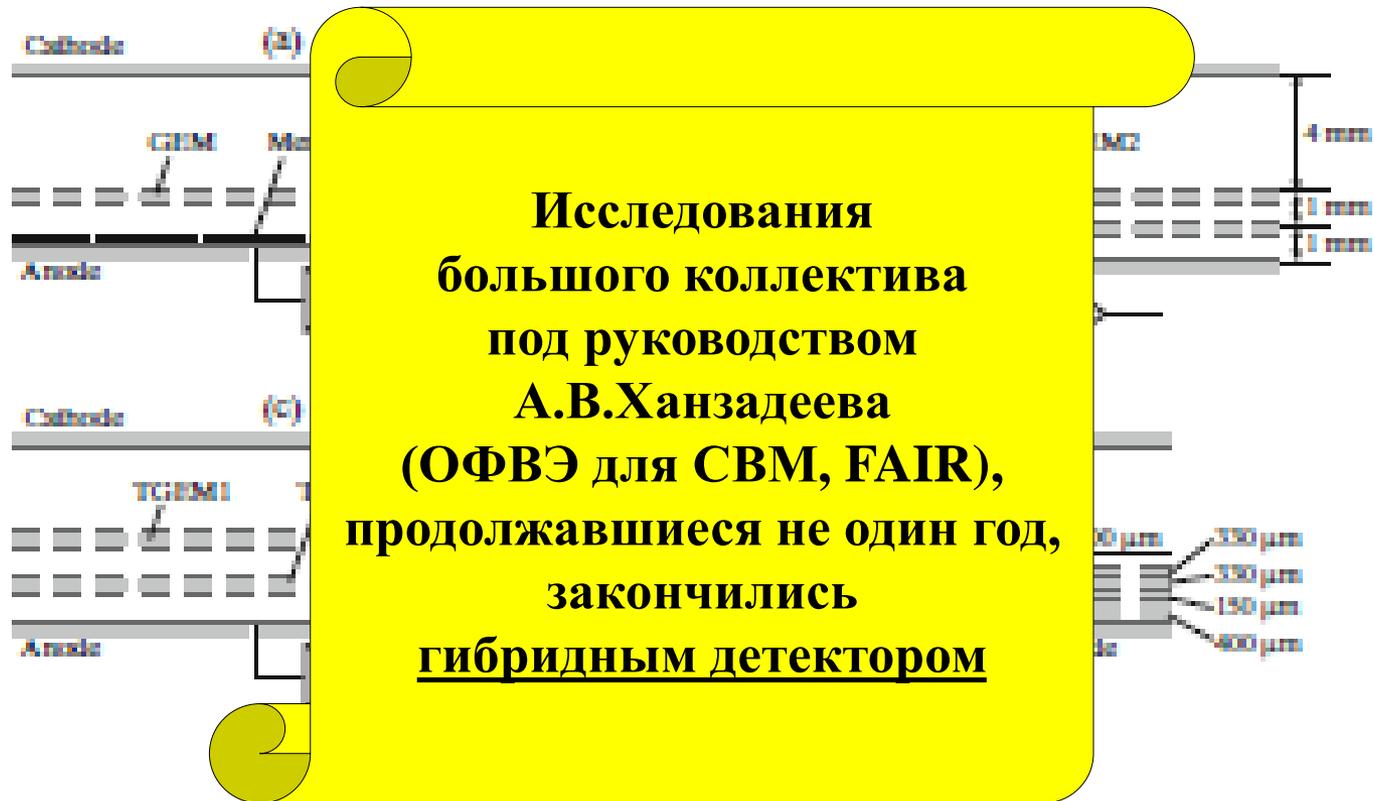
- Electron avalanche in triple-GEM detector

THGEM (thick GEM) – пробои



E. V. Atkin^{a*}, S. S. Volkov^{a,b}, A. G. Voronin^{c**}, V. V. Ivanov^{a,b}, B. G. Komkov^b, L. G. Kudin^b,
E. Z. Malankin^a, V. N. Nikulin^b, E. V. Roshchin^{a,b}, G. V. Rybakov^b, V. M. Samsonov^{a,b***},
O. P. Tarasenkova^b, V. V. Shumikhin^a, A. V. Khanzadeev^{a,b}, and E. A. Chernysheva^b

- Micromegas + GEM (MG)
- Micromegas + Thick GEM (MTG)
- Thick GEM + Thick GEM (DTG)
- GEM + GEM (DG)



РЕЗИСТИВНЫЙ АНОД

ПРОРЫВ

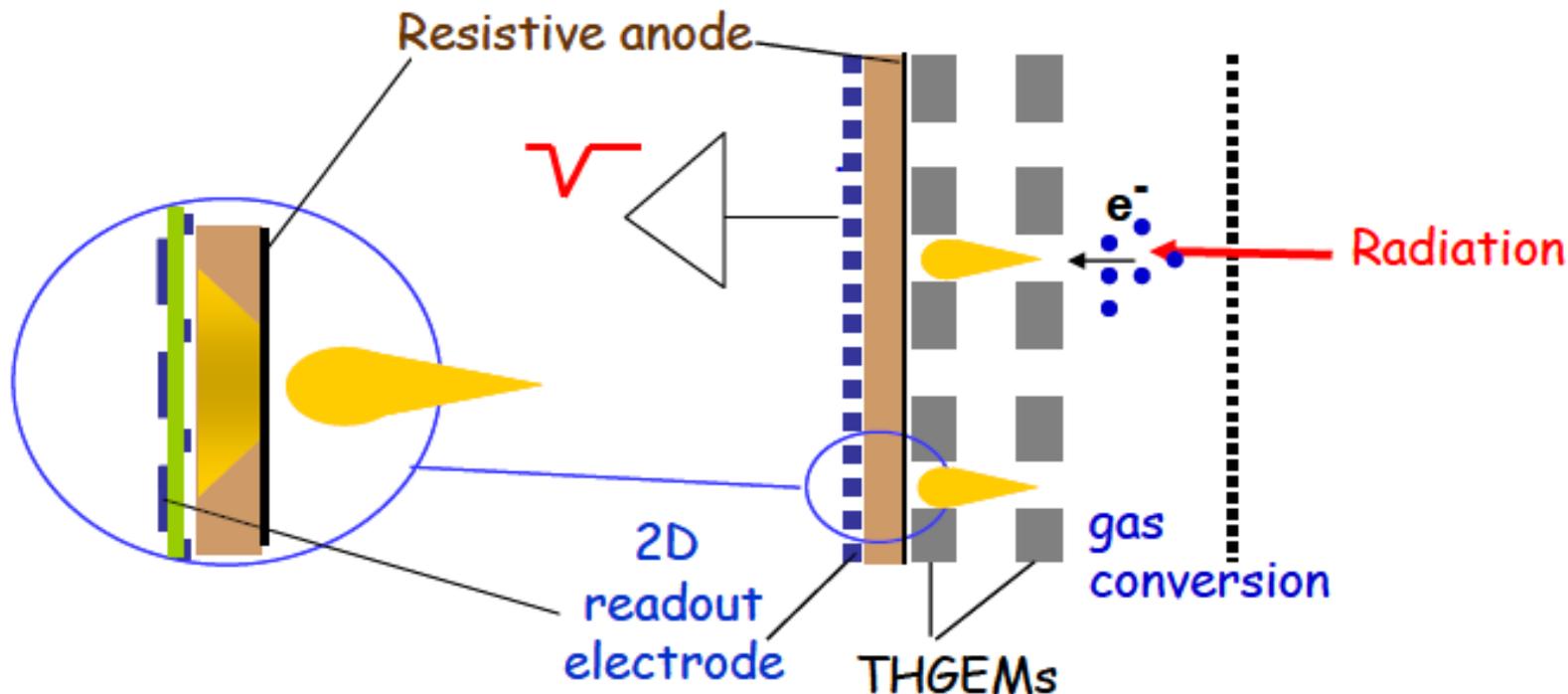
Метод известен с 1986 г. см. G. Bella et al. Thin gap chamber // NIM A252 (1986)

Resistive film for 2D readout

... внедряется в колодезный ГЭУ через 20 лет

Thick GEM-like (THGEM) Detectors and Their Possible Applications

R. Chechik, M. Cortesi, A. *SNIC Symposium, Stanford, California -- 3-6 April 2006*

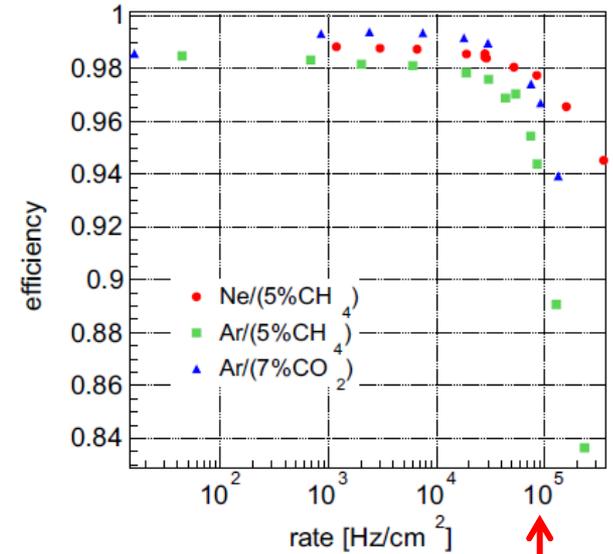
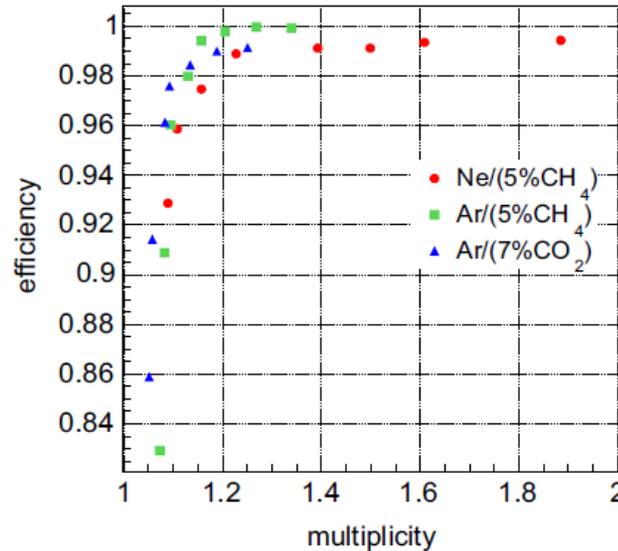
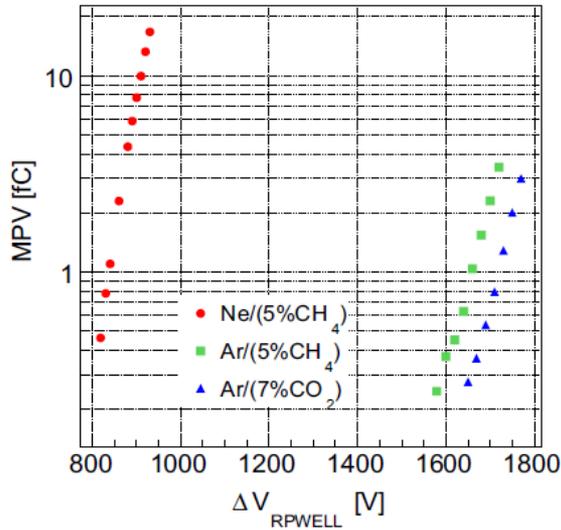
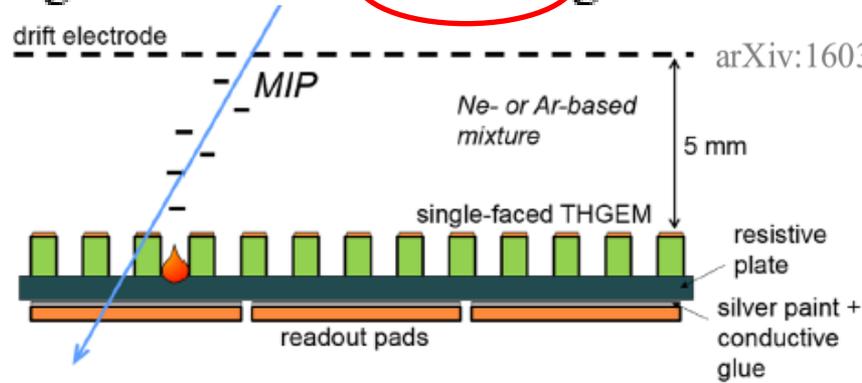


Простая резистивная пластинка в качестве анода

The **Resistive-Plate WELL** with Argon mixtures - a robust gaseous radiation detector

RPWELL

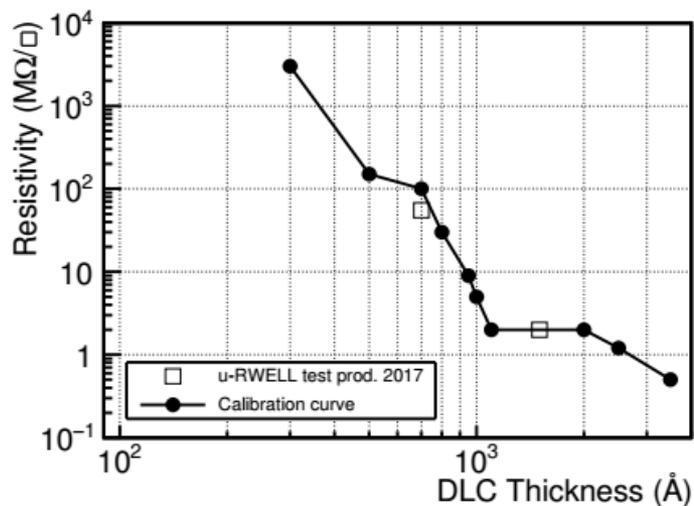
arXiv:1603.04820v1 2016



$$R = \rho \cdot l / (l \cdot d) = \rho / d \text{ [Ом/}\square\text{]} = 10^9 \text{ Ом/}\square \rightarrow \underline{10^5 \text{ Гц/см}^2}$$

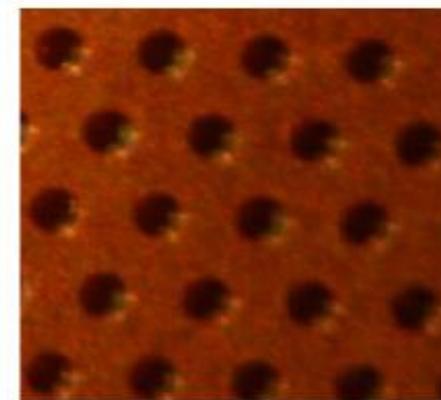
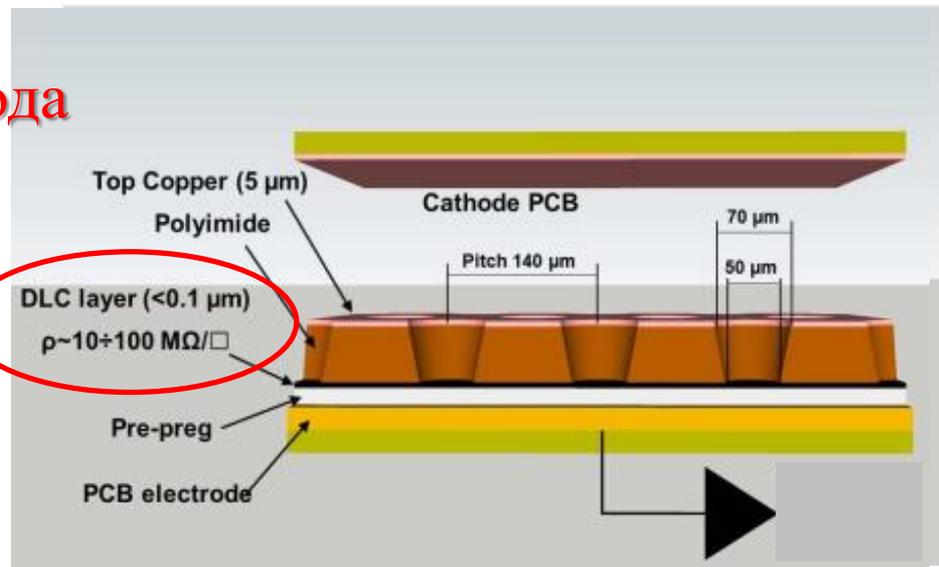
!MWPC!

Пленка алмазоподобного углерода в качестве анода



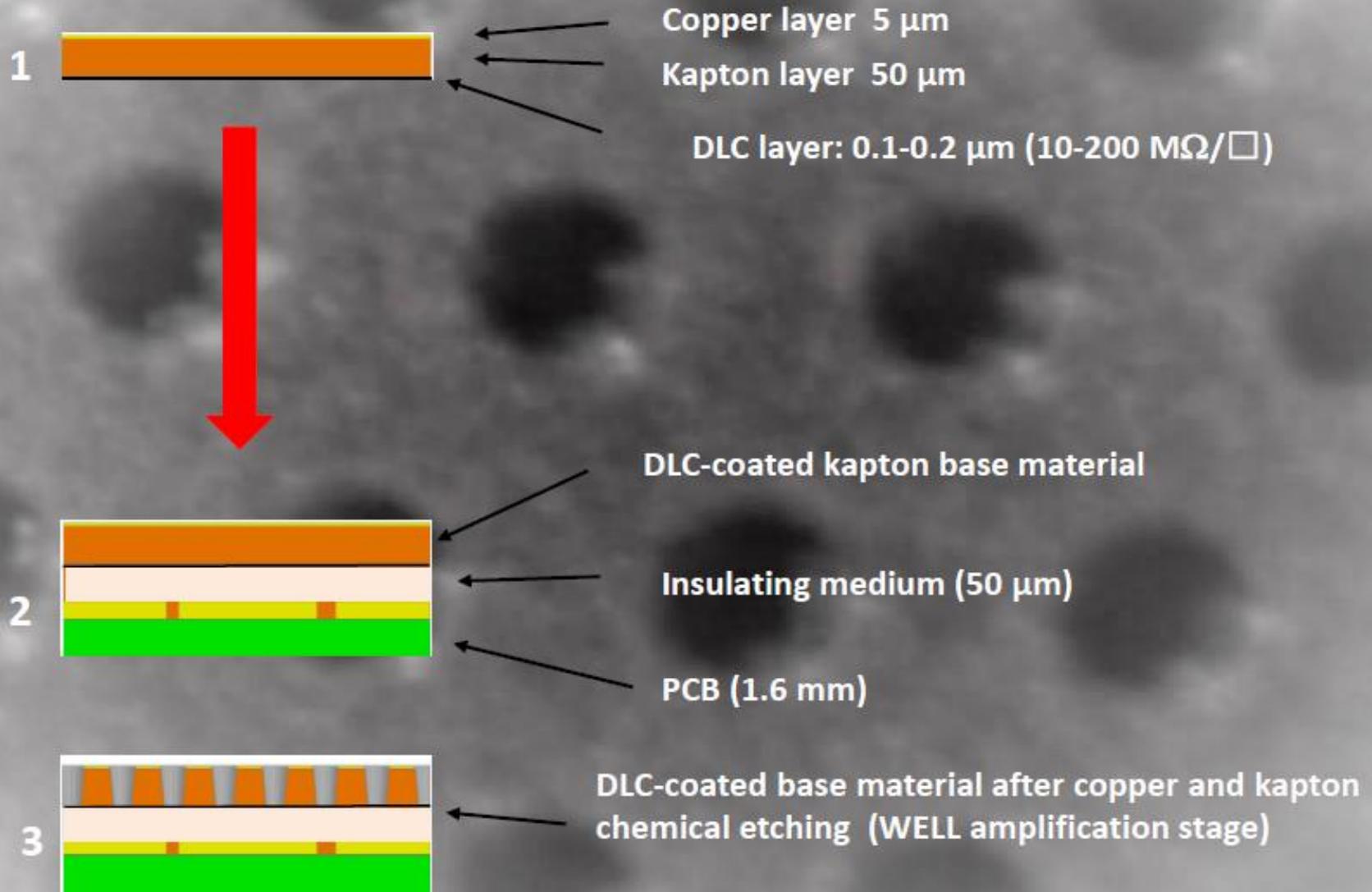
Толщина DLC ~100 нм

Сопротивление $R = \rho/d$ [Ом/□] ~10 МОм/□



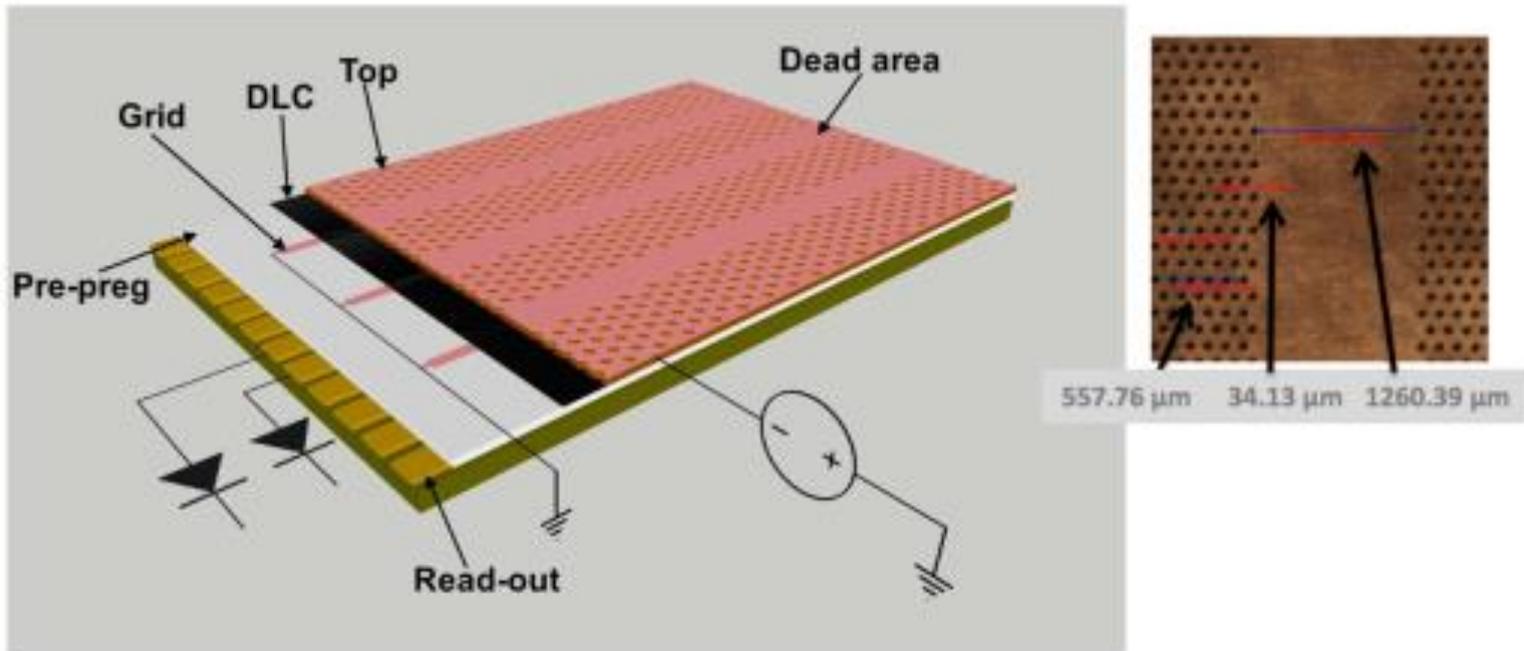
The μ -RWELL amplification stage

single resistive layer w/edge grounding



HR layouts: the Silver grid

G.Bencivenni, et al. 2019. JINST. 14. P05014.



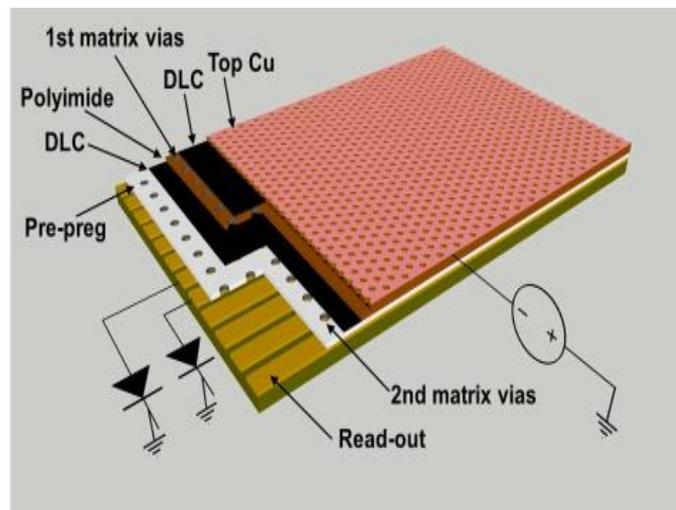
The **SG** is a simplified HR scheme based on a **Single Resistive layer** with a **2-D grounding** by means a **conductive strip lines grid** realized on the DLC layer.

The **conductive grid lines** can be screen-printed or **etched** by photo-lithography (*using the DLC+Cu deposition technology developed at USTC – Hefei*).

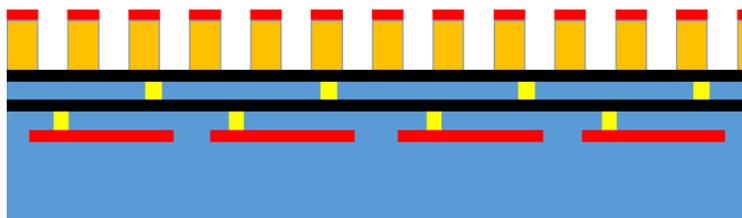
The **conductive grid** can induce instabilities due to discharges over the DLC surface, thus requiring for the **introduction of a small dead zone** on the amplification stage.

High rate μ -RWELL Double resistive layer

G.Bencivenni, et al. 2019. JINST. 14. P05014.



Эта работа
проводится для
ЛНСб-муон,
т.к. для CMS-муон
требуется меньшее
быстродействие



Достижения μ -RWELL (CERN+LNF, Италия) 2017-2019 г.г.

С 2014 г. ведется огромная работа

... вкладываются большие ресурсы в технологию и создание прототипов

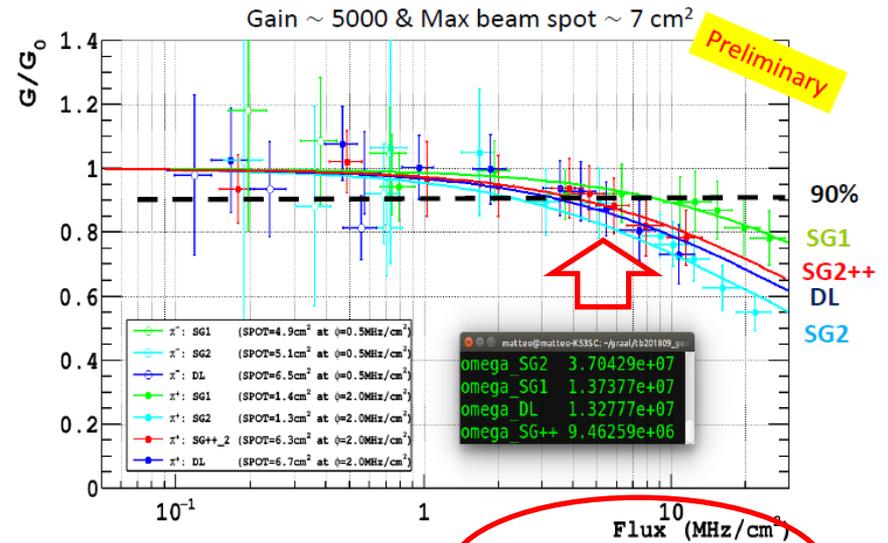
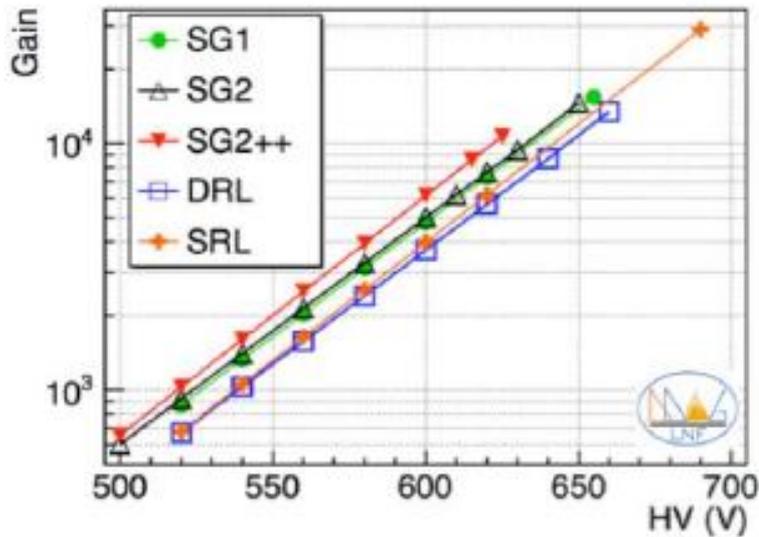
... тесты проводятся на интенсивном π -мезон. пучке в PSI

... исследуется радиационное старение на GIF++ (CERN)

... море публикаций, пропаганда

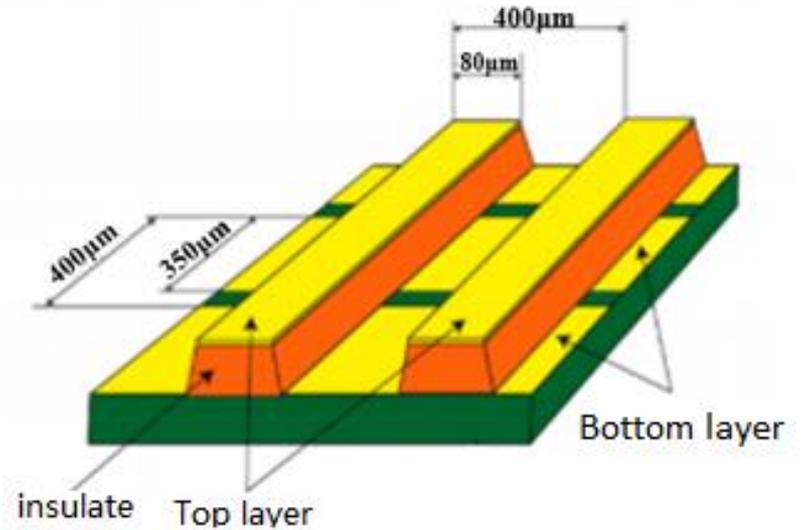
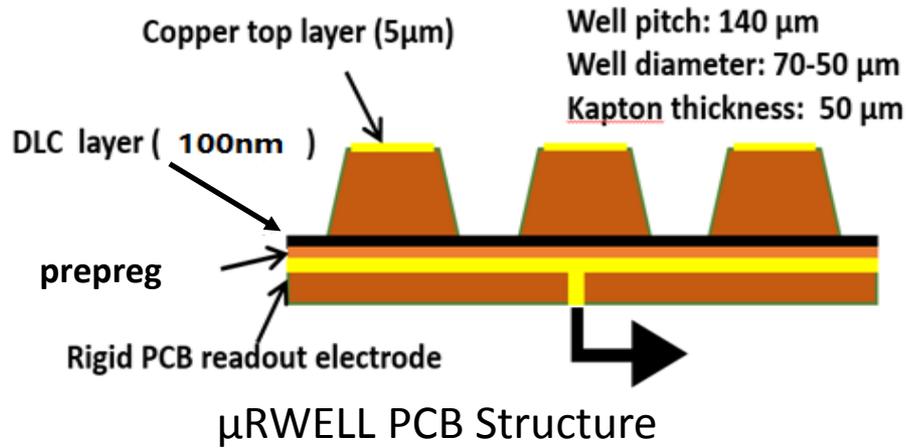
Bencivenni G., et al. 2019. JINST. 14. P05014.

HR layouts performance: the rate capability

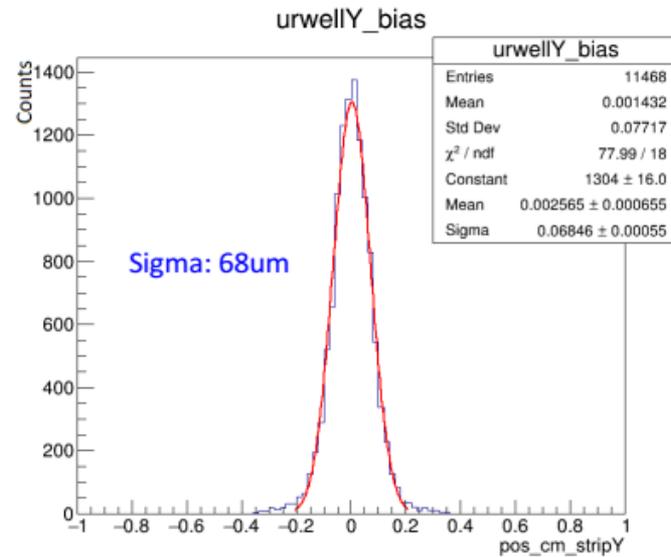
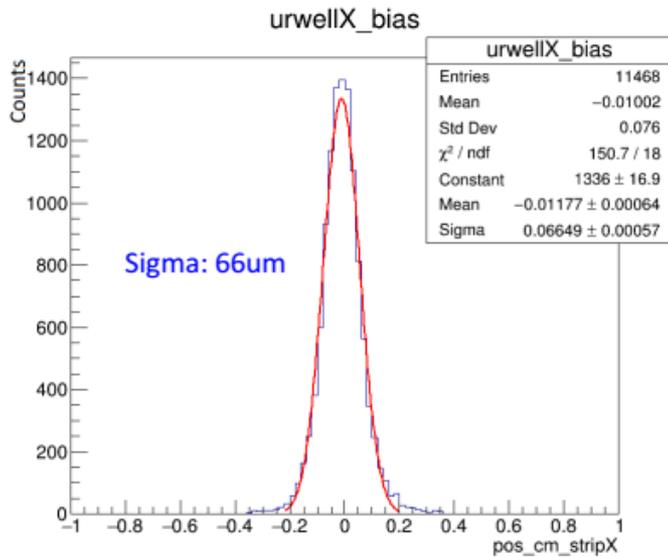


10⁶ - 10⁷ Гц/см²

Пространственное разрешение по X и Y $\sigma \sim 70$ мкм



- Avalanche voltage: 555V
- Y position resolution(Top layer): 68 μ m
- X position resolution(Bottom layer): 66 μ m



ИЮНЬ 2018
 Yi Thou et al.
 CERN

CMS GE2/1 sector μ RWell prototype

HV scan, RIGHT M4



H4 test beam with 150 GeV muons:

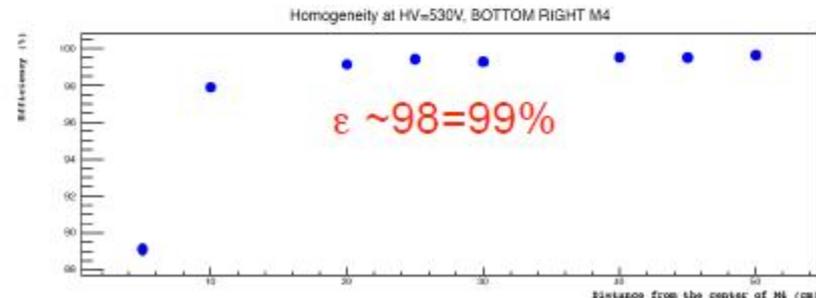
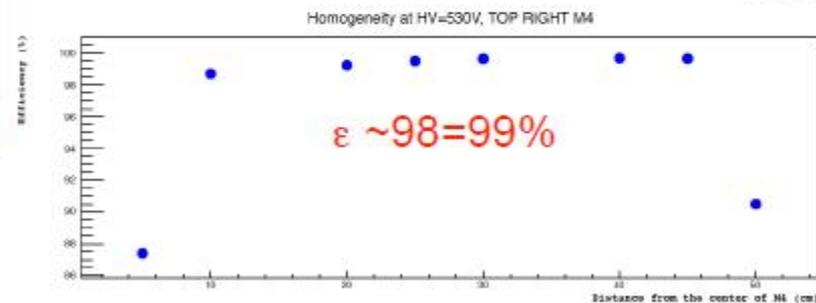
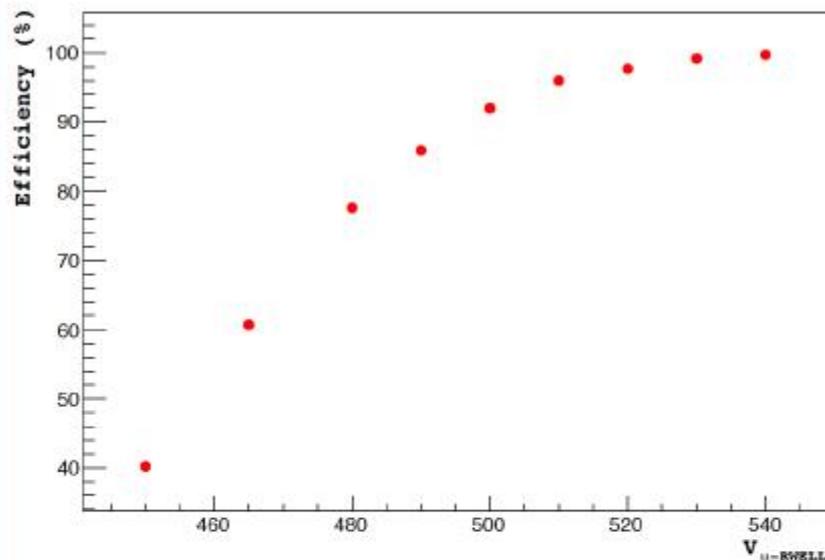
- Voltage scan (amplification scan)
- Uniformity scan across the surface of the detector at 530 V (~12000 gain, still to be conditioned)
- Small high rate prototype reached a gain of $\sim 10^5$ and a rate of ~ 700 khz/cm²

The **excellent** results obtained demonstrate the great collaboration between INFN-Eltos and Rui de Oliveira's lab

GE2/1 20° sector with M4 μ RWells
(2 m height, 1.2 m base)



M4 μ RWell



Micro-RWELL gaseous detector

G. Morello, et al. (15 авторов) 55th International Winter Meeting on Nuclear Physics
23-27 January, 2017. Bormio, Italy



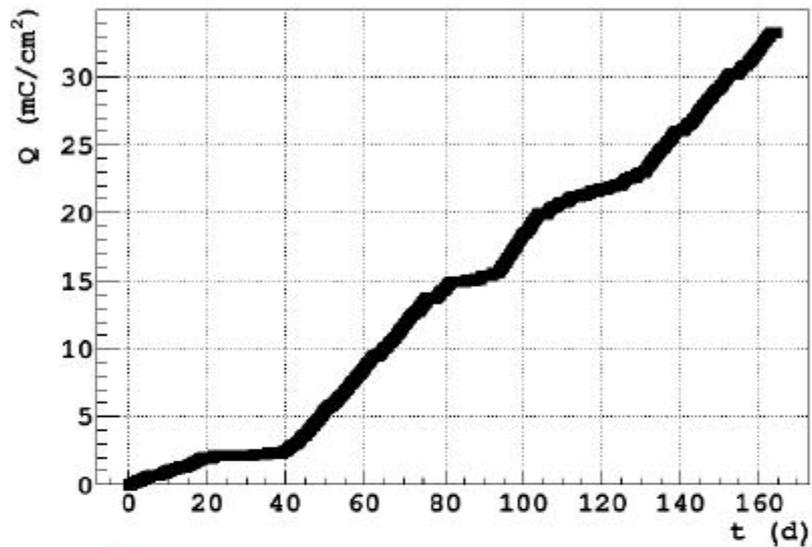
CMS, GE2/1

**A killer
of
Triple-GEM
at CMS**

CMS GE1/1 μ RWell: GIF++ ageing test



- 1) GE1/1 μ -RWell (ArCO₂)
- 2) "high rate" μ -RWell (ArCO₂CF₄) 10cmx10cm
- 3) reference μ -RWell (ArCO₂) 10cmx10cm



GE1/1 has accumulated a dose of ~ 32 mC/cm² (more than 10 times the dose after 10 years of HL-LHC)

μ RWell prototypes exposed inside the GIF++



GE2/1 μ RWell: cost estimate

| | Unit cost | Total (CHF) | | Estimate from |
|---|-----------|---------------|---------------|------------------|
| PCB Boards | | | | |
| ReadOut (1/8 of GE21 RO) | 218 | 1744 | | ELTOS/CISTELAYER |
| Drift Board (one single board) | 763 | 763 | | MDT |
| Panasonic Connectors + soldering | 5 | 1000 | | CERN catalogue |
| RWELL Foil * | | | | |
| Base Material (1/4 of GE21) (no mass production cost) | 180 | 720 | | CERN |
| DLC (1/4 of GE21) (no mass production cost) | 300 | 1200 | | CERN |
| Gluing RO+Kapton (1/8 of GE21) | 109 | 872 | | ELTOS/CISTELAYER |
| Etching (1/4 of GE21) (no mass production cost) | 1000 | 4000 | | CERN |
| GE21 mechanical structure | | | | |
| | | 1799 | | Meroni & Longoni |
| GE21 chamber total cost | | 12098 | | |
| GE21 72 chambers total | | 871020 | | |
| HV System (72 μRWELL) RADIALL system ** | | | | |
| | unit cost | 8 ch + cath. | 4 ch + cath. | |
| HV module AG550-24 ch. RADIALL | 5188 | 77826 | 41507 | CAEN |
| HV cable (€/m) | 5.5 | 8993 | 4796 | TECHNIKABEL |
| HV connector (+ pins) € | 60+2.5 | 5886 | 3139 | CERN |
| HV PS SY4527 | 6431 | 6431 | 6431 | CAEN |
| HV filters (€) | 5 | 3924 | 2093 | ELTOS/CISTELAYER |
| Subtot. | | 103060 | 57966 | |
| TOT. (HV system +72 μRWELL) | | 974080 | 928986 | |

DAREHME GEM

* Possible reduction of 30% on the "RWELL foil", corresponding to a 20% reduction on the final detector cost

** Possible discount of 10% on the HV system, corresponding to a 2% on the final system
 Not included in the table the common costs to the GEM option (GEM, Korean kapton, etc.)

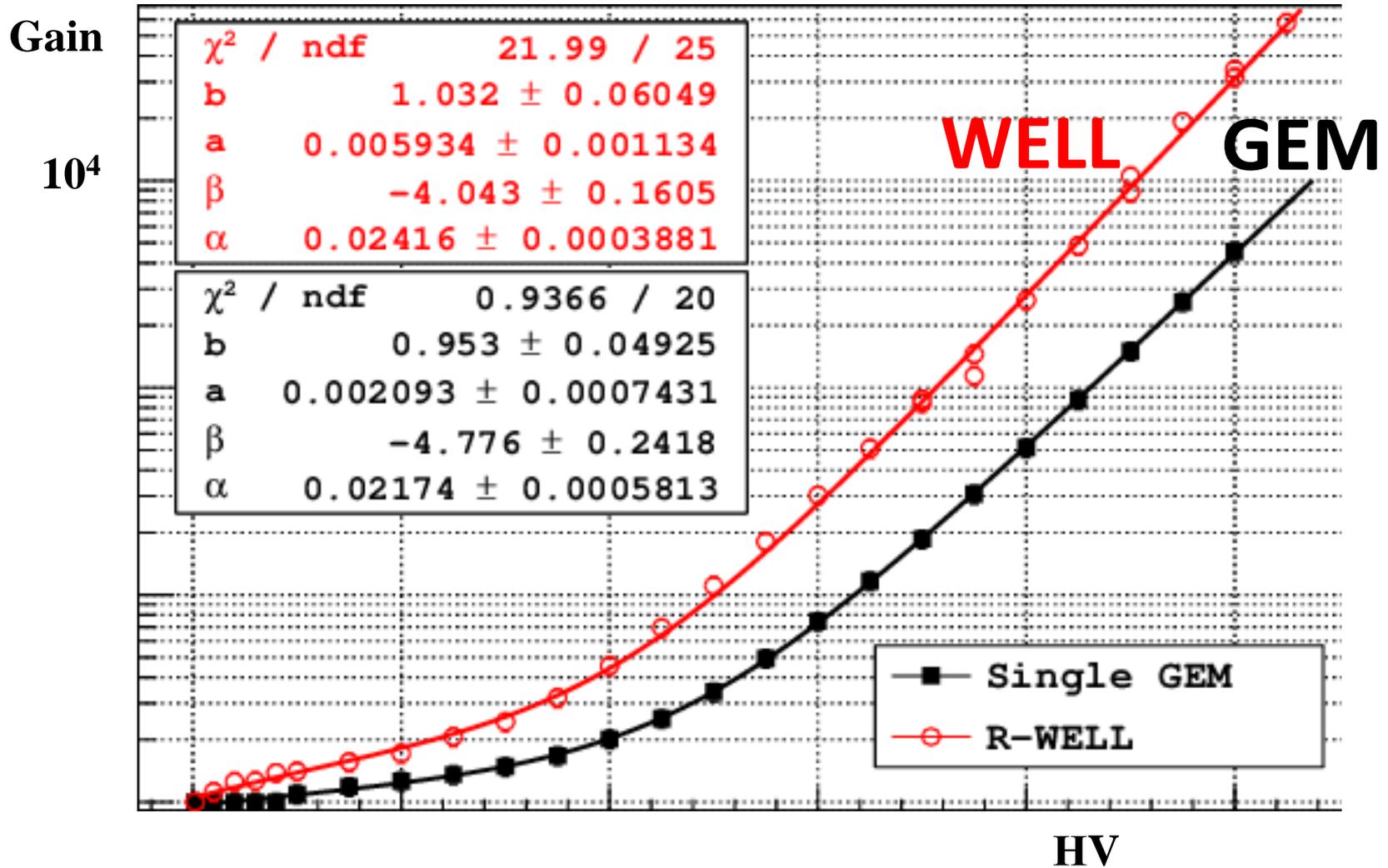
Cost ~1/2 GEM

GEM vs. WELL

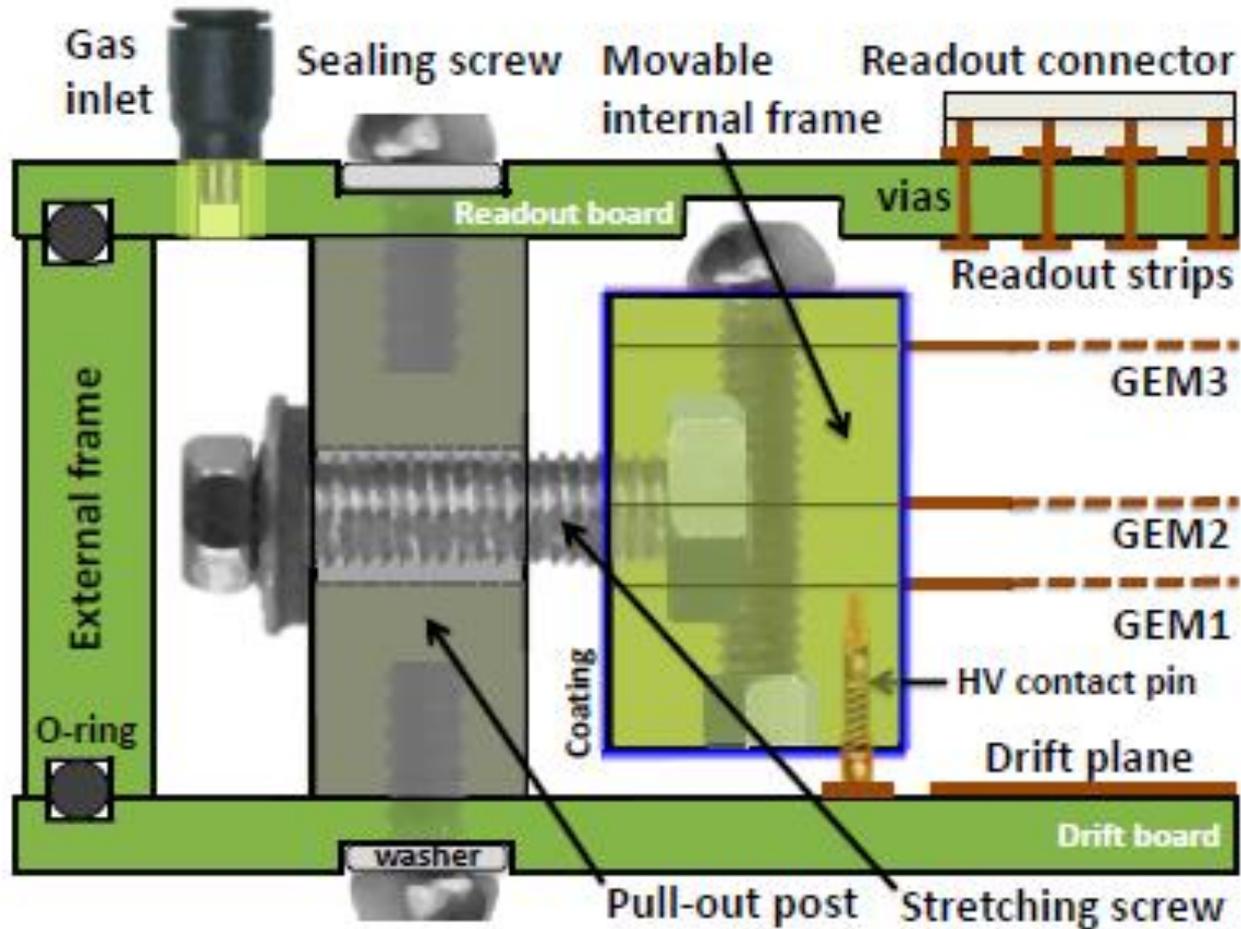
- Высокое быстродействие GEM (10^8 Гц/см²) → при определенных условиях WELL не уступает GEM. Но дальше у WELL преимущества, у GEM - недостатки!
-

- Ненадежный, требуется каскадирование (Triple-GEM) → надежный
- Требуется сегментация электродов → не требуется
- При одинаковом усилении → сигнал больше в 5-10 раз
- Необходимо натяжение пленки (~6 кг/сторона) → нет
- Высокие требования к планарности электродов → нет
- 6 напряжений HV-питания (Triple-GEM) → 1 при том же усилении
- HV- строгая синхронность ramping-up/ramping-down → безразлично
- Суммарное HV (Triple-GEM) → много ниже (single gap)
- Маленькое плато эффективности в зависимости от напряжения → большое
- Индукционный зазор + транспортные зазоры → нет
- Диффузия (Triple-GEM)/простр. разрешение → меньше/лучше
- Стоимость (Triple-GEM) → меньше в 2-3 раза
- Больше вещества (радиационная длина) → меньше в 3 раза
- Ошибка параллакса → проще изгиб в цилиндр. и сферическую полверхность для исключения параллакса
- Фронт выходного импульса и длительность импульса → короткие фронт и импульс

Без индукционного зазора сигнал и эффективное усиление существенно больше

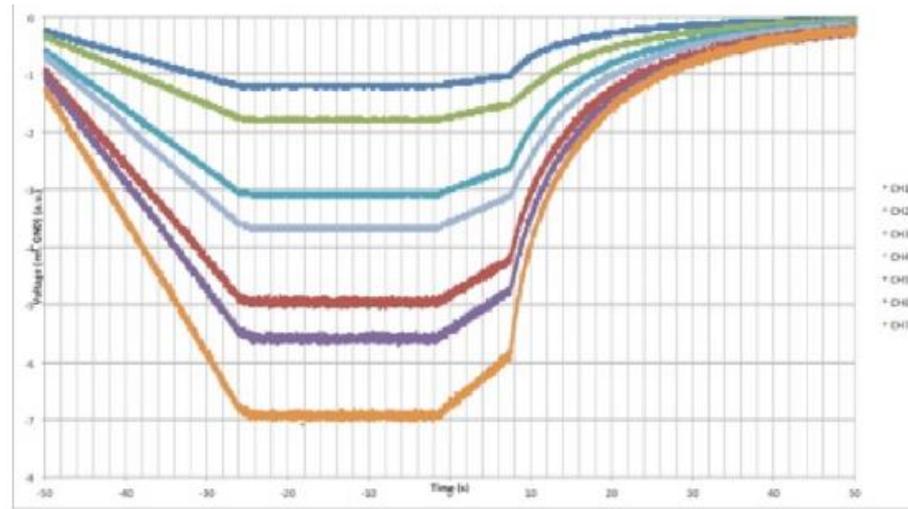


Натяжение пленок Triple-GEM, CMS



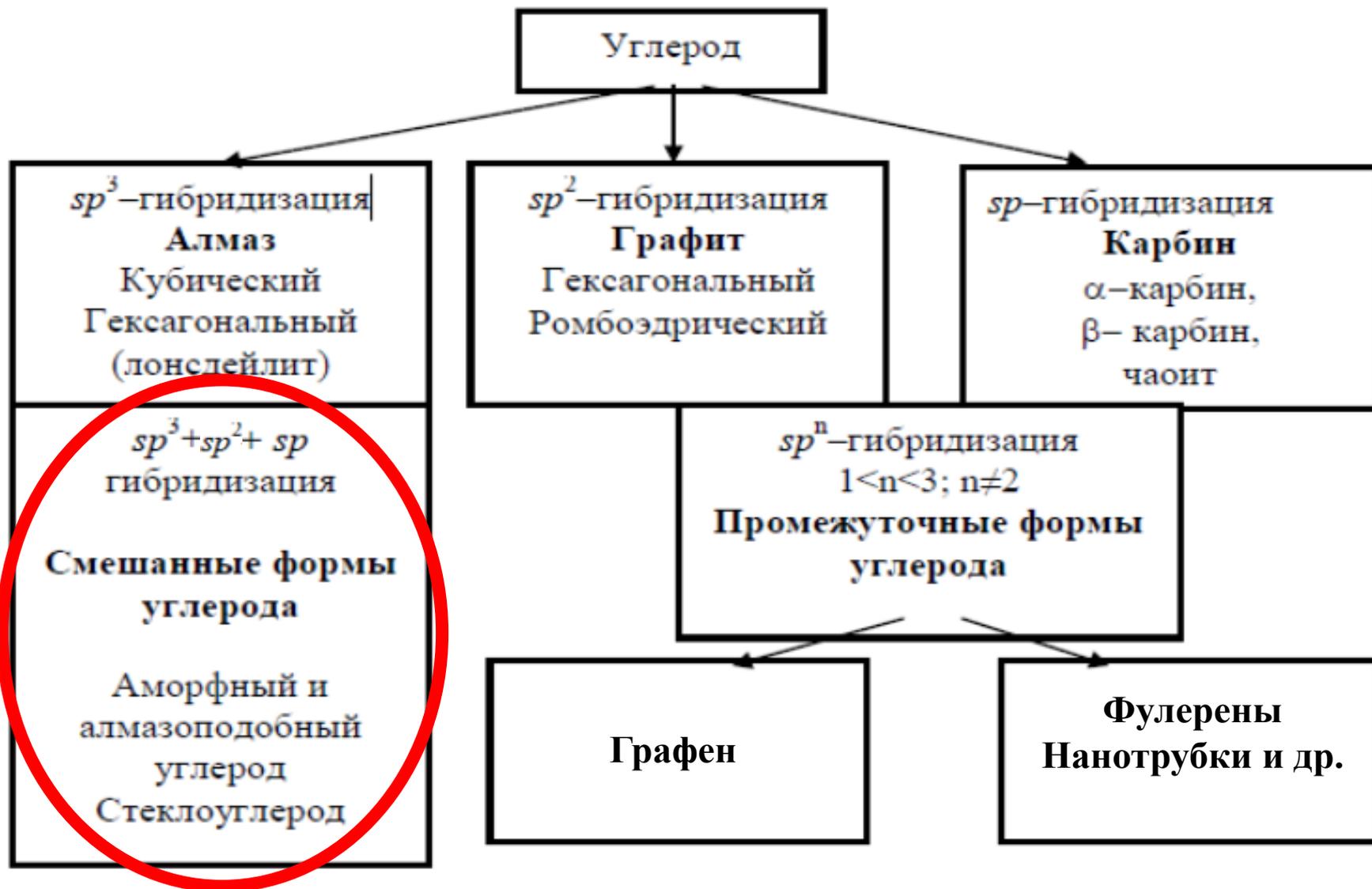
CAEN HV rumping-up/rumping-down for Triple-GEM, CMS

Необходимо
7 потенциалов
СИНХРОННО



Часть II
Собственные достижения в
колодезном ГЭУ с АПУ-анодом
в 2019 г.

Алмазоподобный углерод

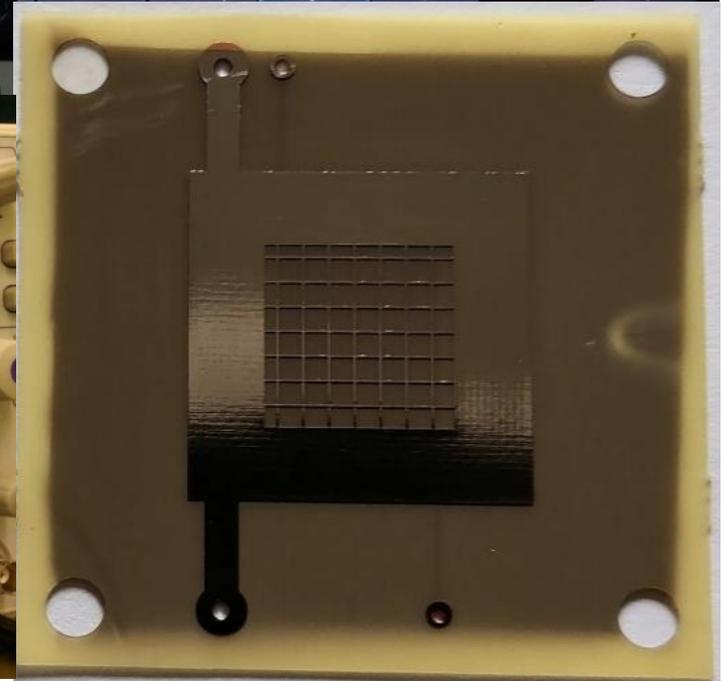
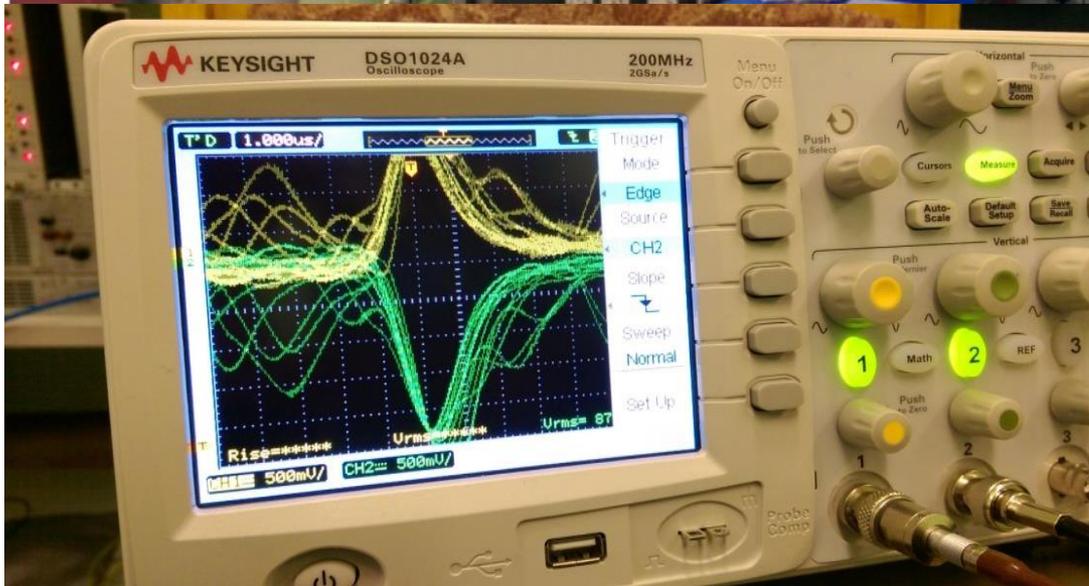


Micro-Pattern Gaseous Detectors (MPGD)

Minsk-Protvino-Gatchina-Dubna

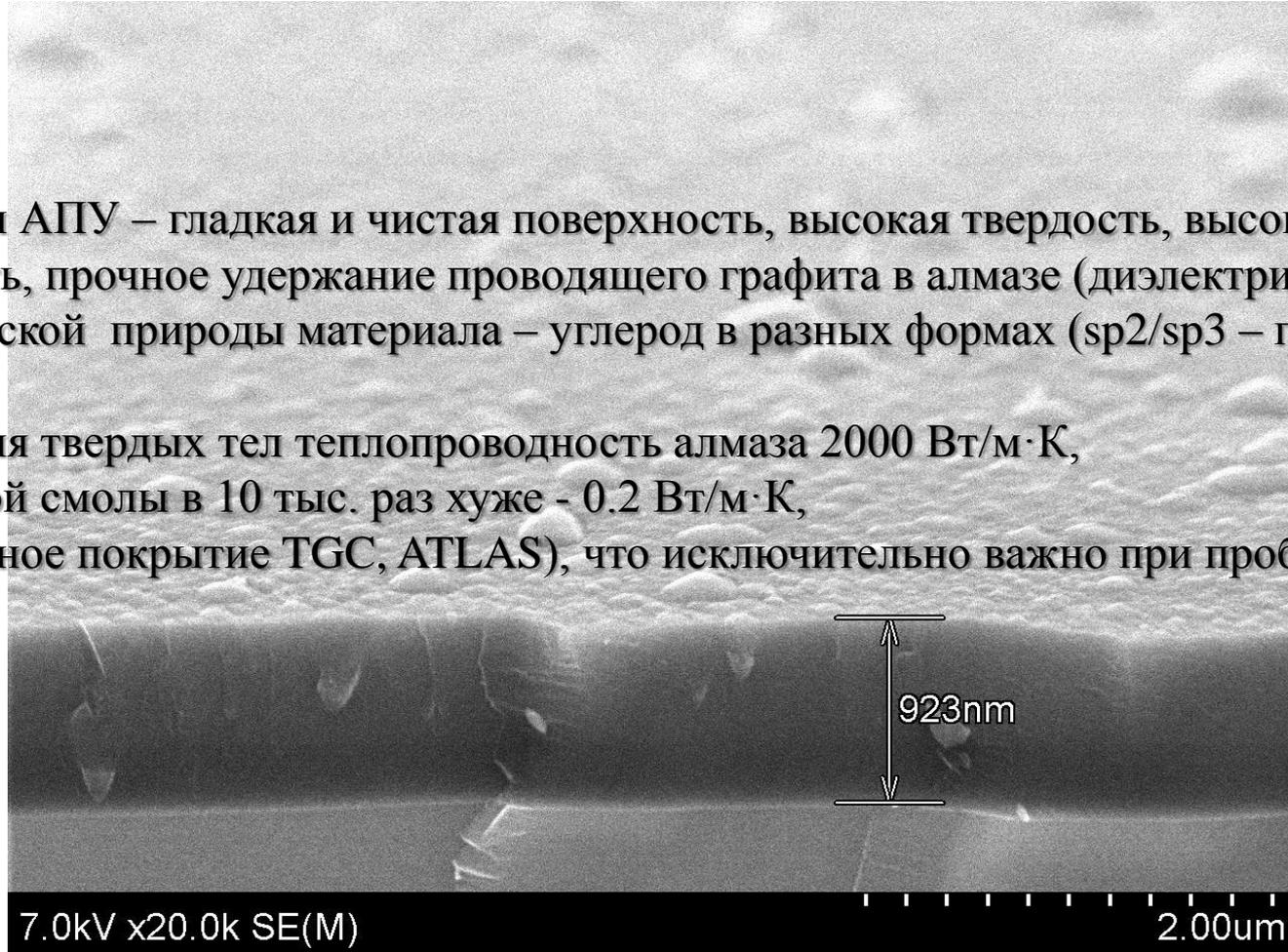
Неформальная коллаборация из представителей 7 институтов,
Координатор А.К.

Рабочее место



Поверхность DLC (электронный микроскоп)

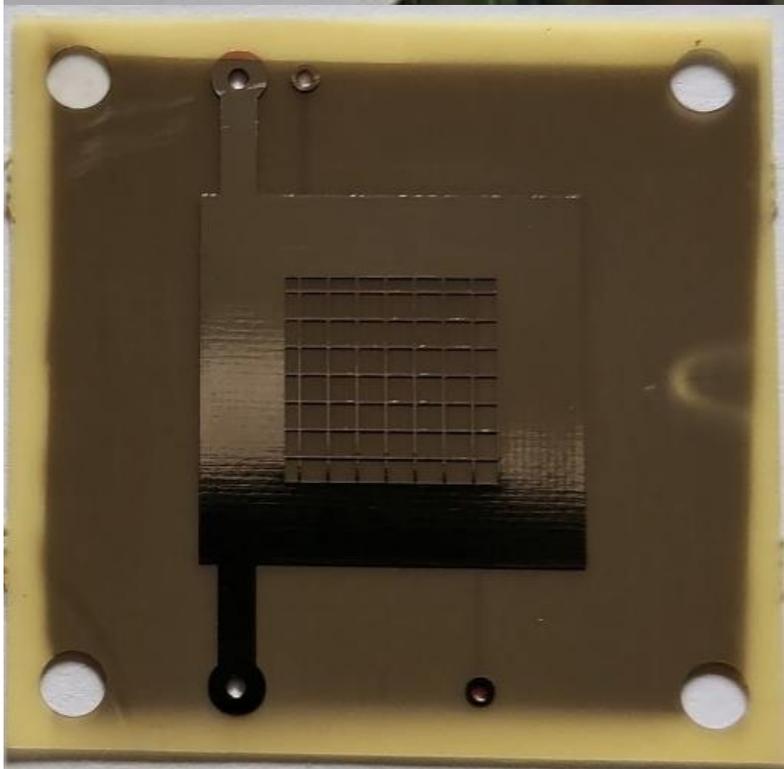
Пленка, нанесенная в Минске



Особенности АПУ – гладкая и чистая поверхность, высокая твердость, высокая рад.стойкость, прочное удержание проводящего графита в алмазе (диэлектрике) за счет кристаллической природы материала – углерод в разных формах (sp^2/sp^3 – гибридизация, ~50%)

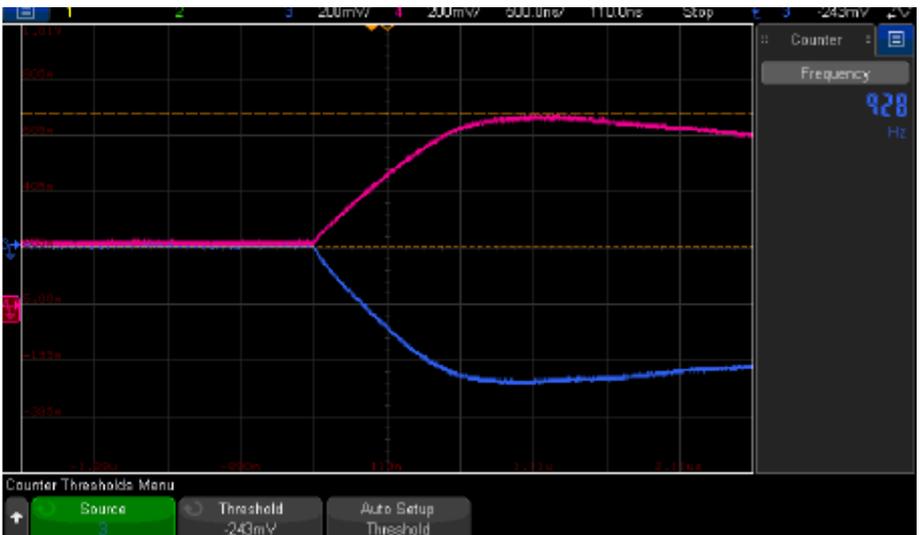
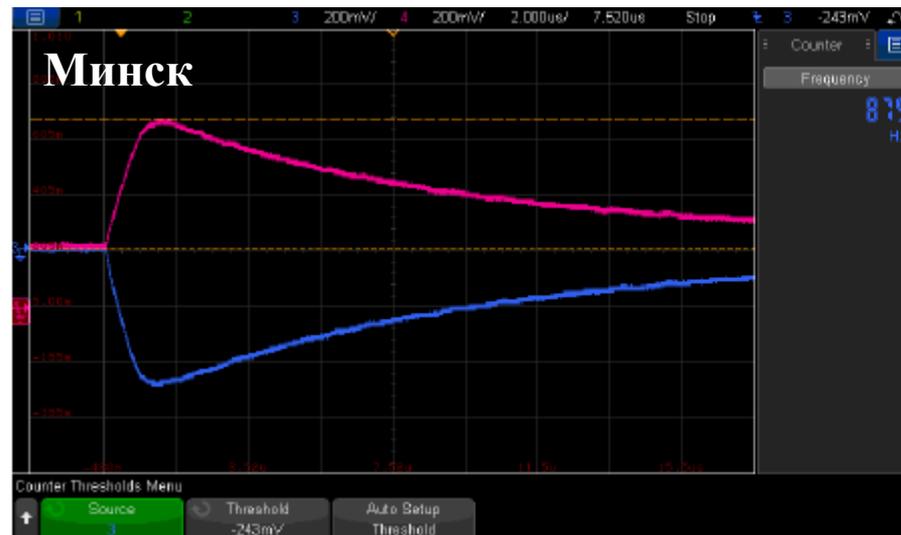
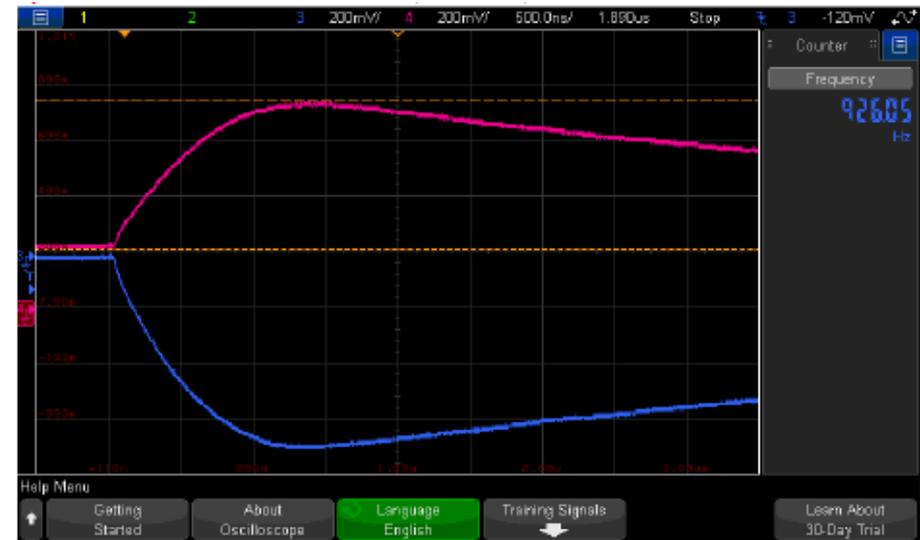
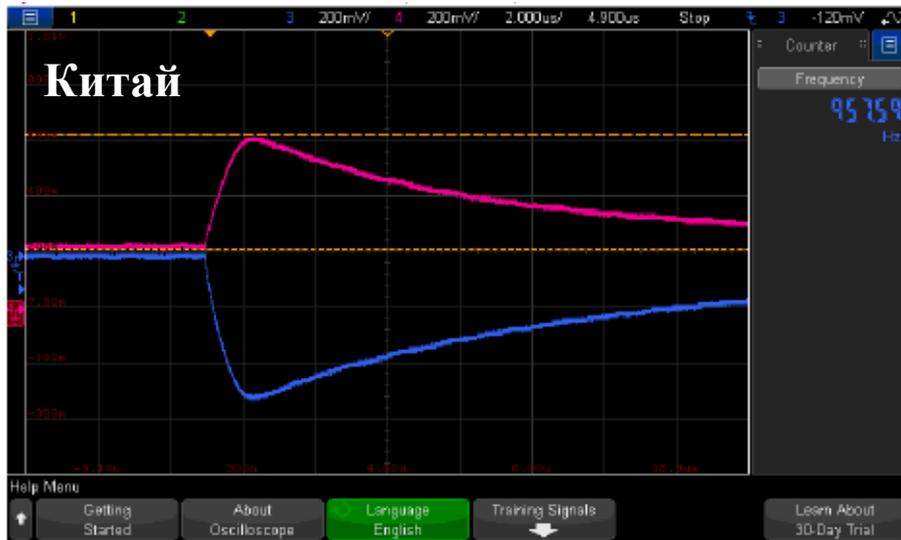
Рекордная для твердых тел теплопроводность алмаза 2000 Вт/м·К, (у эпоксидной смолы в 10 тыс. раз хуже - 0.2 Вт/м·К, см. резистивное покрытие TGC, ATLAS), что исключительно важно при пробоях по графиту!

Резистивный анод DLC на каптоне и стеклотекстолите

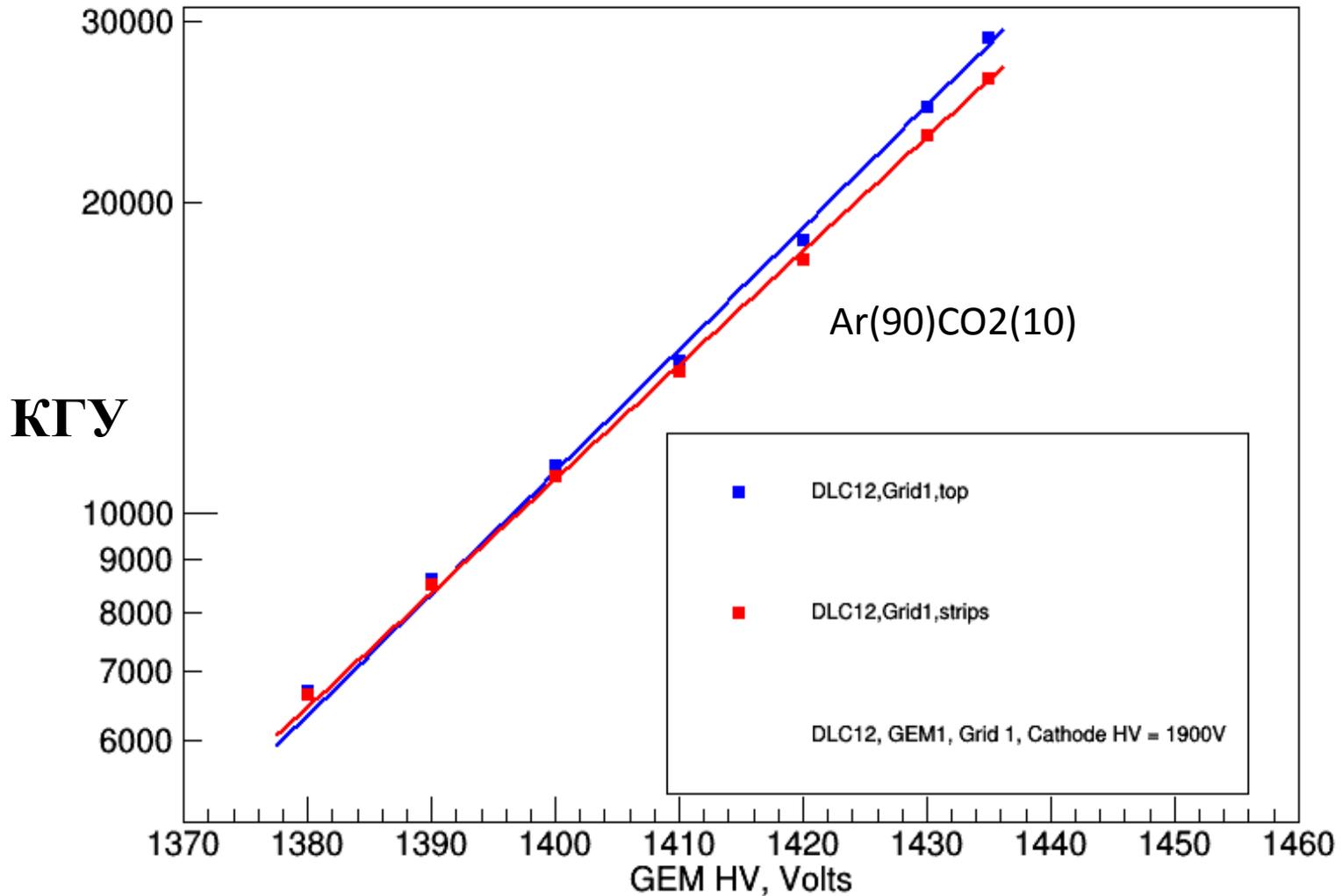


Первые импульсы с колодезного ГЭУ с резистивным DLC-анодом

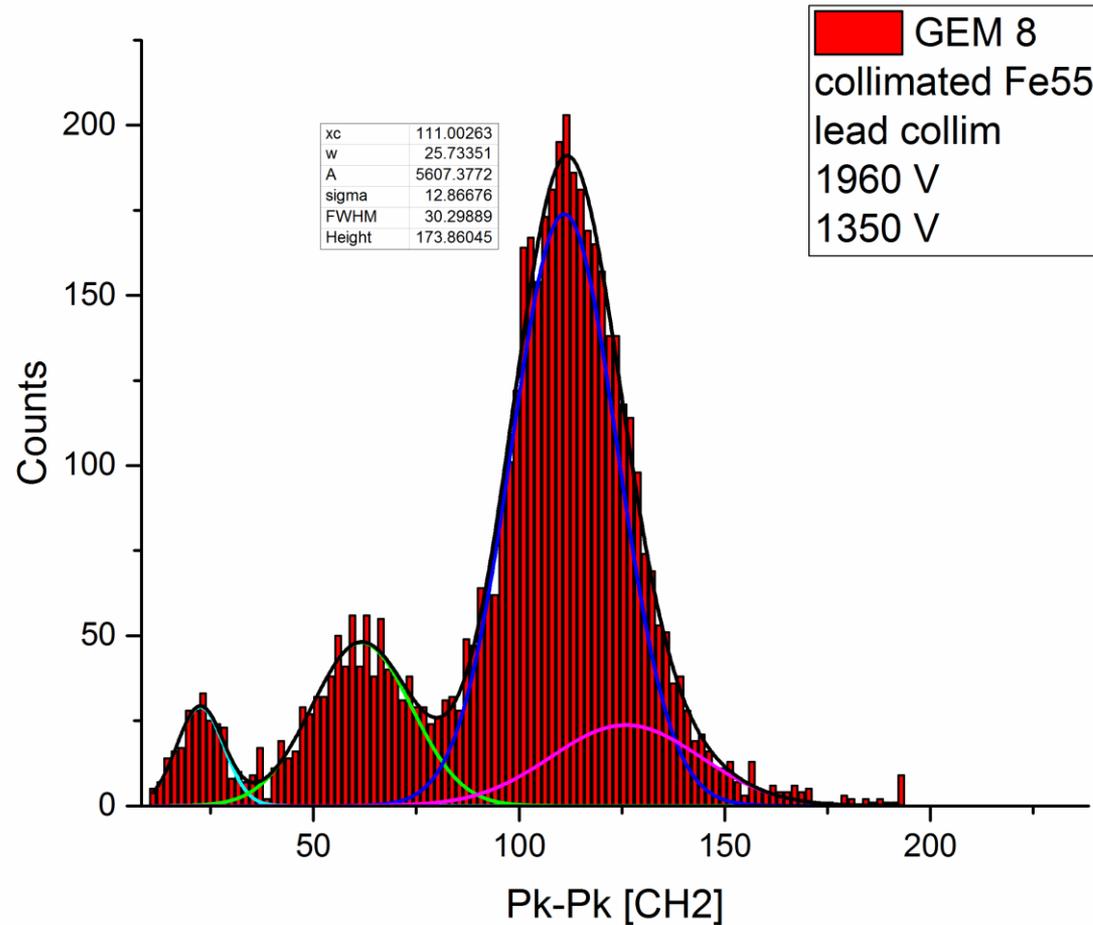
Ноябрь 2018 г.



Коэффициент газового усиления (КГУ)



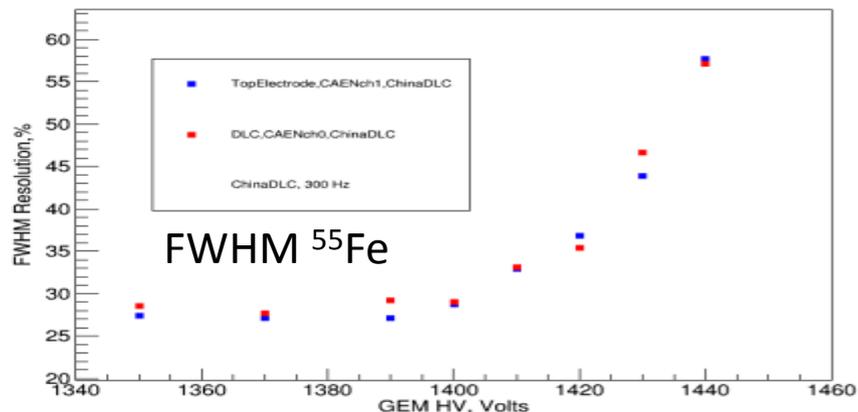
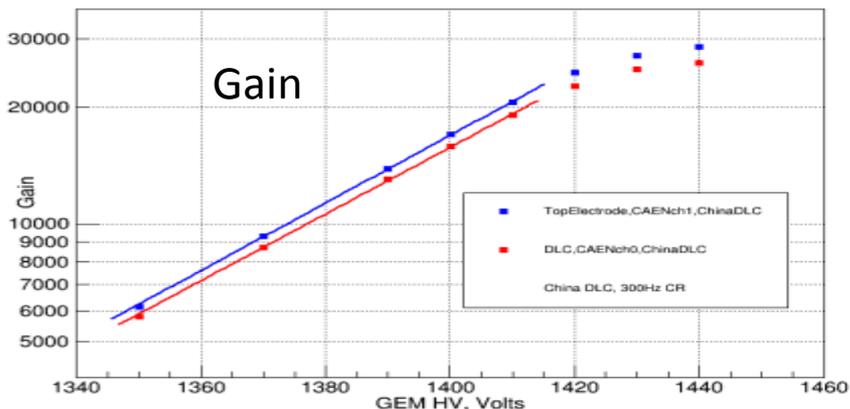
Сравнение пленок, выполненное на источнике Fe-55



Сравнение пленок, выполненное на источнике Fe-55

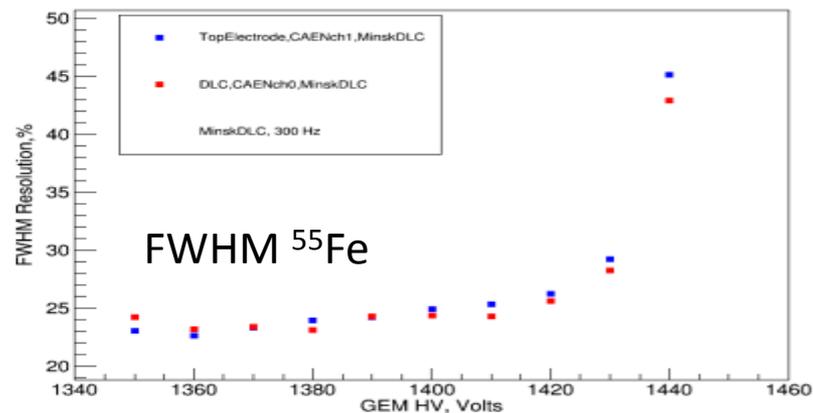
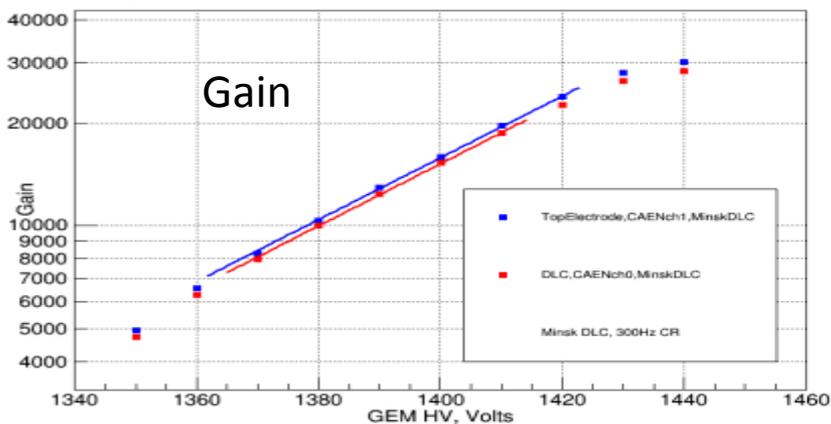
DLC 500 MΩ/□

(China - поставщик DLC для u-RWELL)

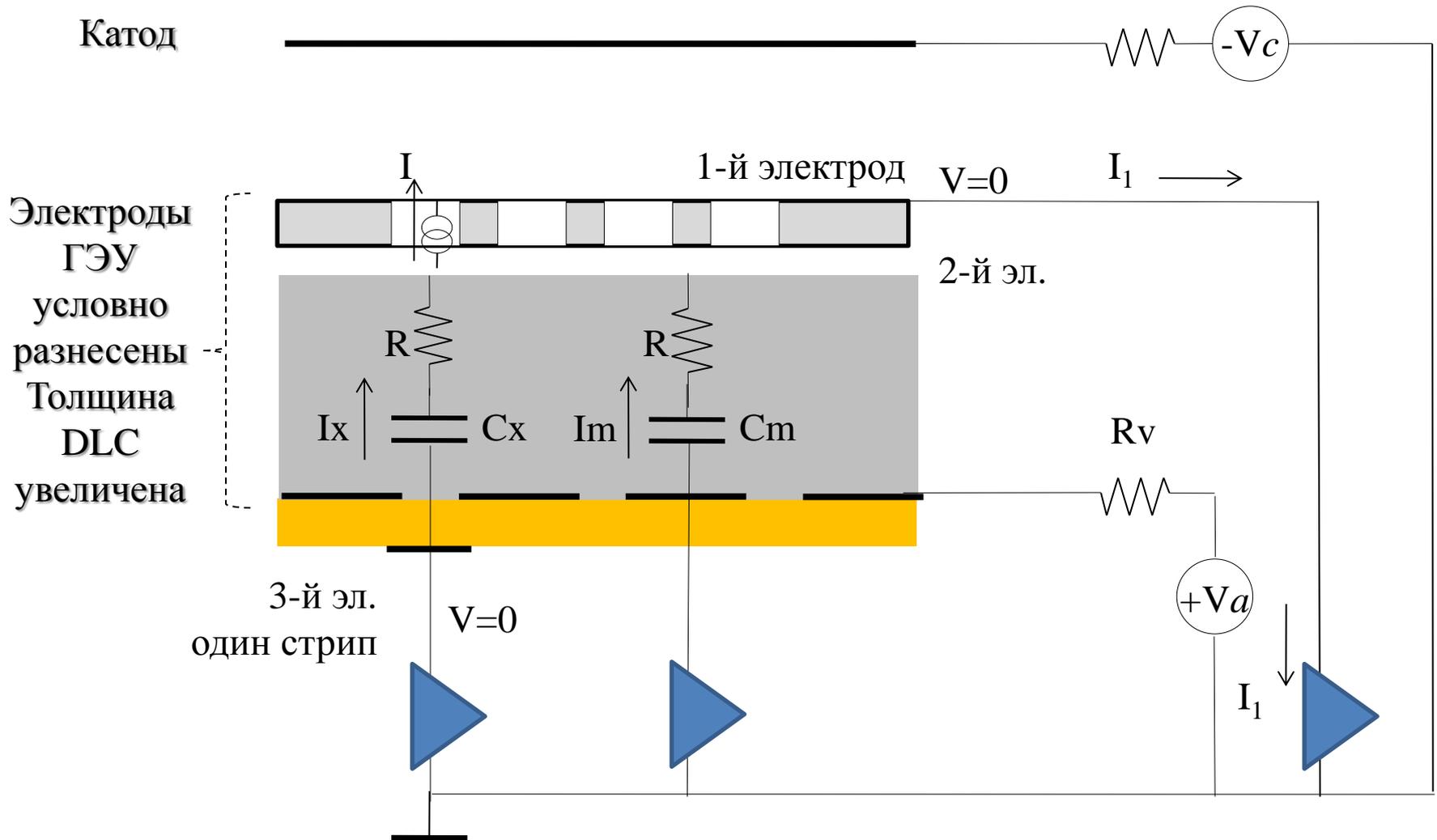


DLC 25 MΩ/□

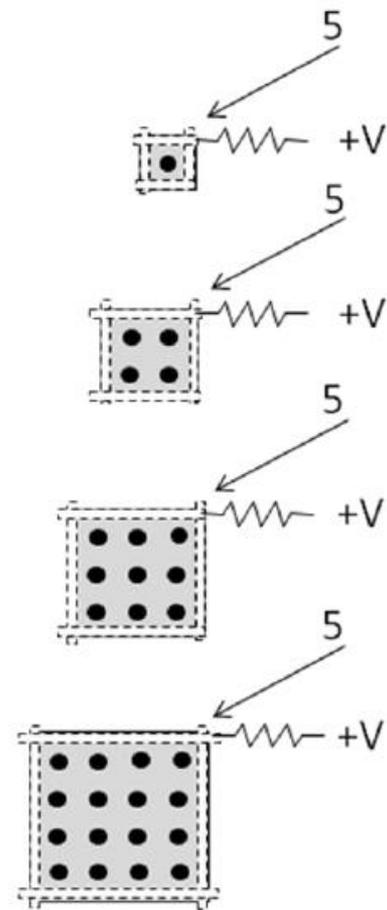
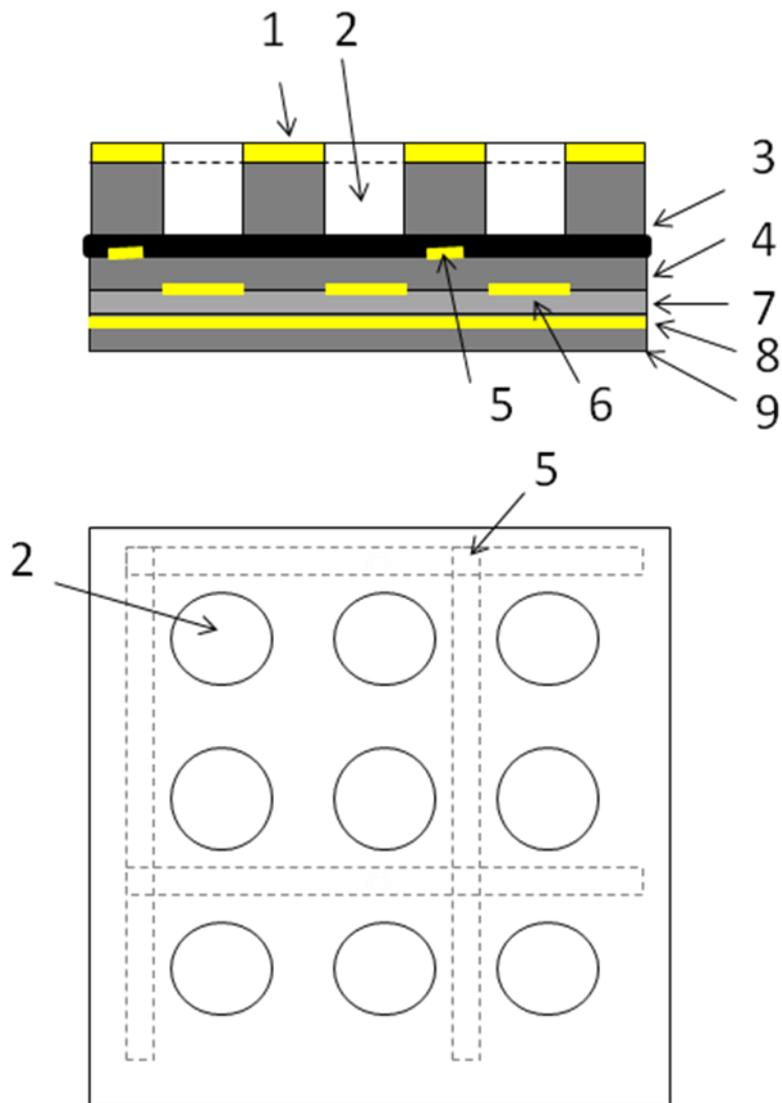
(Минск)



Эквивалентная схема АПУ

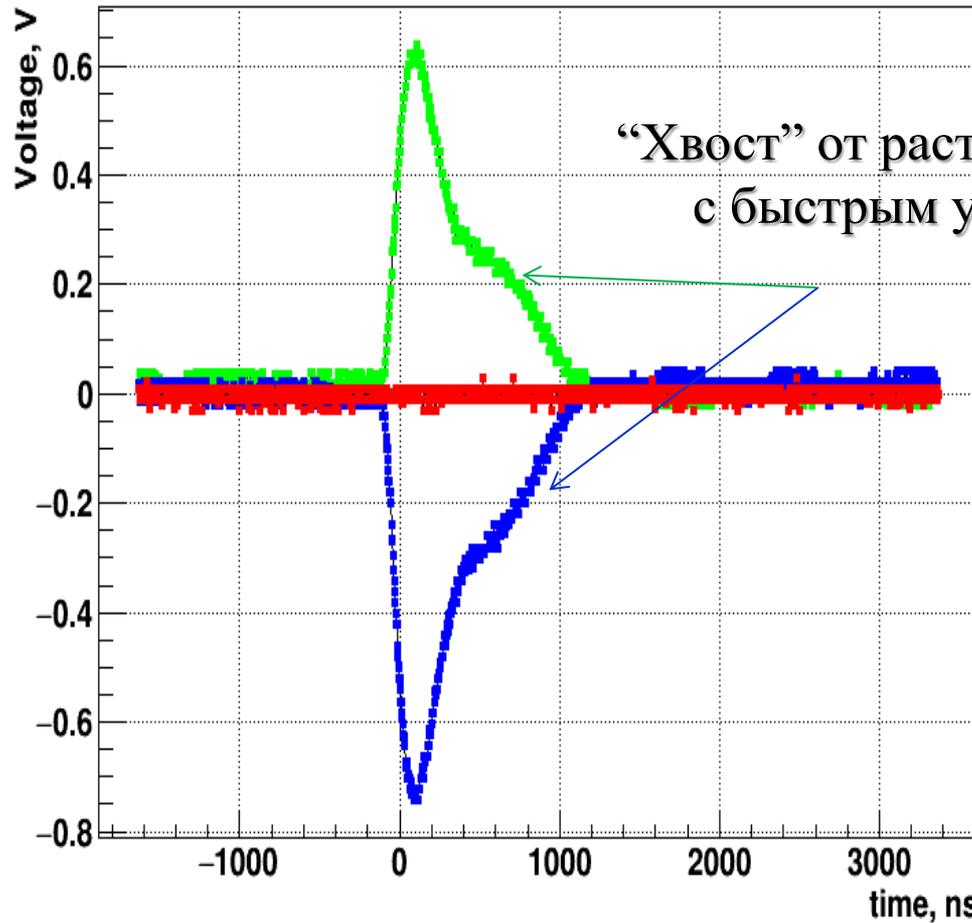


Эвакуация электронов с резистивной поверхности на металлическую



Первые импульсы с колодезного ЭУ с резистивным DLC-анодом

Scope



“Хвост” от растекания заряда электронов
с быстрым усилителем ($T_r=160$ нс)

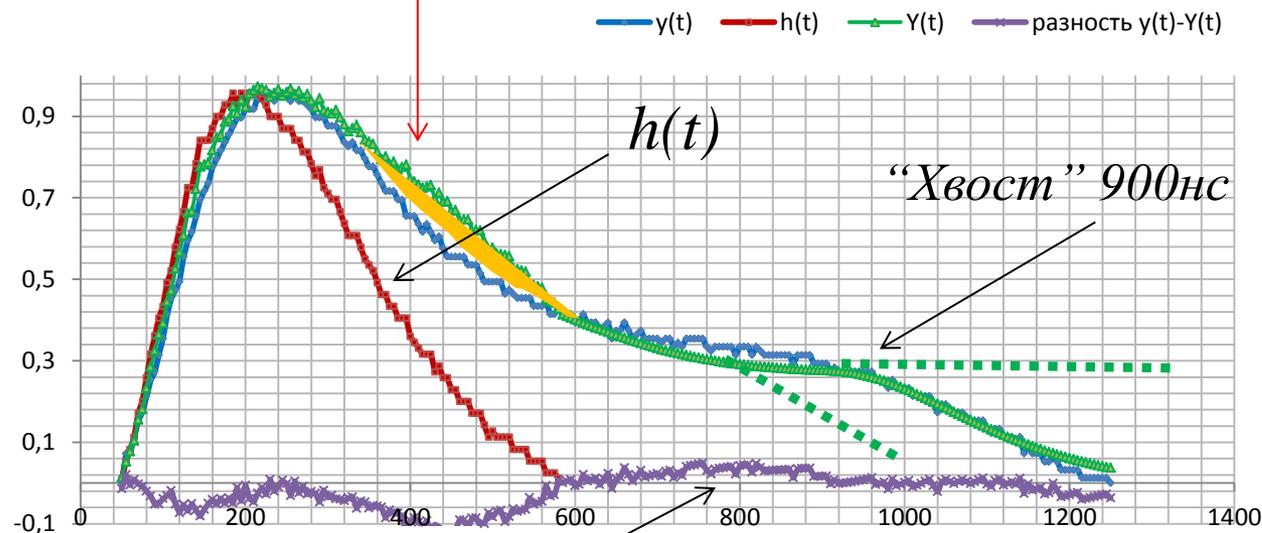
Верхний электрод
Нижний электрод (DLC)

Реконструкция сигналов на электродах

$$y(t) = x(t) \oplus h(t)$$

Если $x(t) = \delta(t) + 1(t)$, то наблюдаемый сигнал неплохо описывается

Функция растекания заряда по резистивной поверхности не есть $1(t)$, а спадающая функция

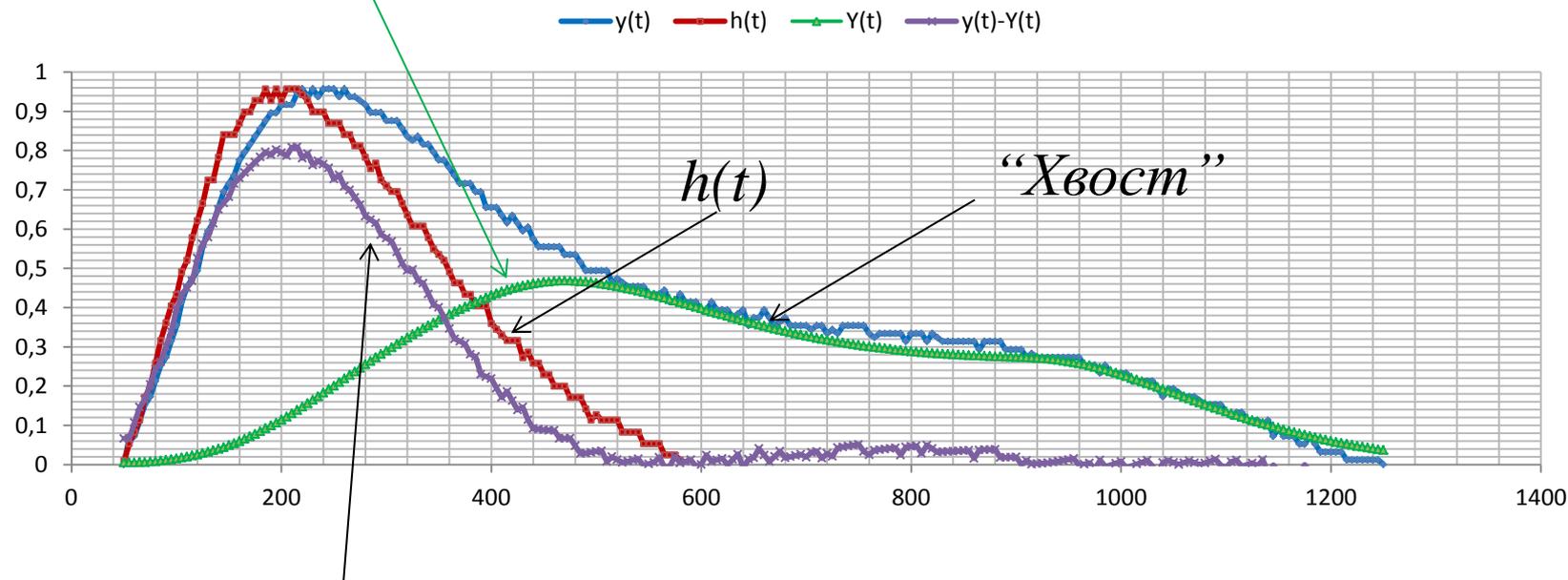


Погрешность реконструкции

Реконструкция сигналов на электродах

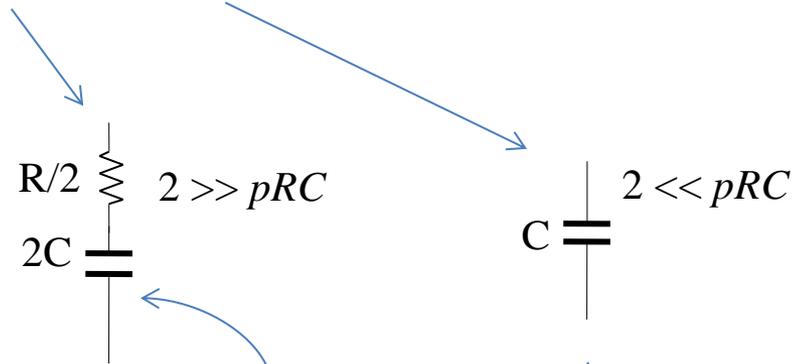
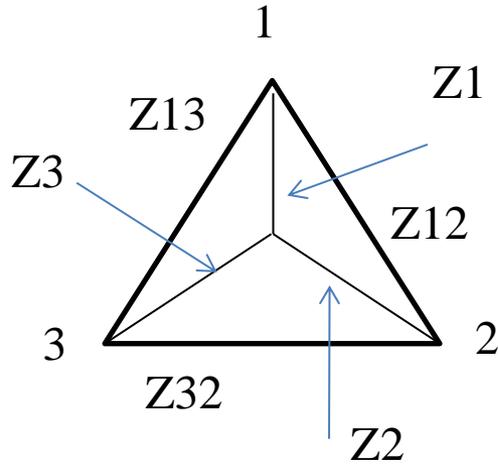
$$y(t) = x(t) \oplus h(t)$$

Если убрать $\delta(t)$, то в реконструируемом сигнале сильно затянут фронт, чего нет в реальном сигнале



Погрешность реконструкции

Из эквивалентного преобразования импедансов находим НЧ и ВЧ модели



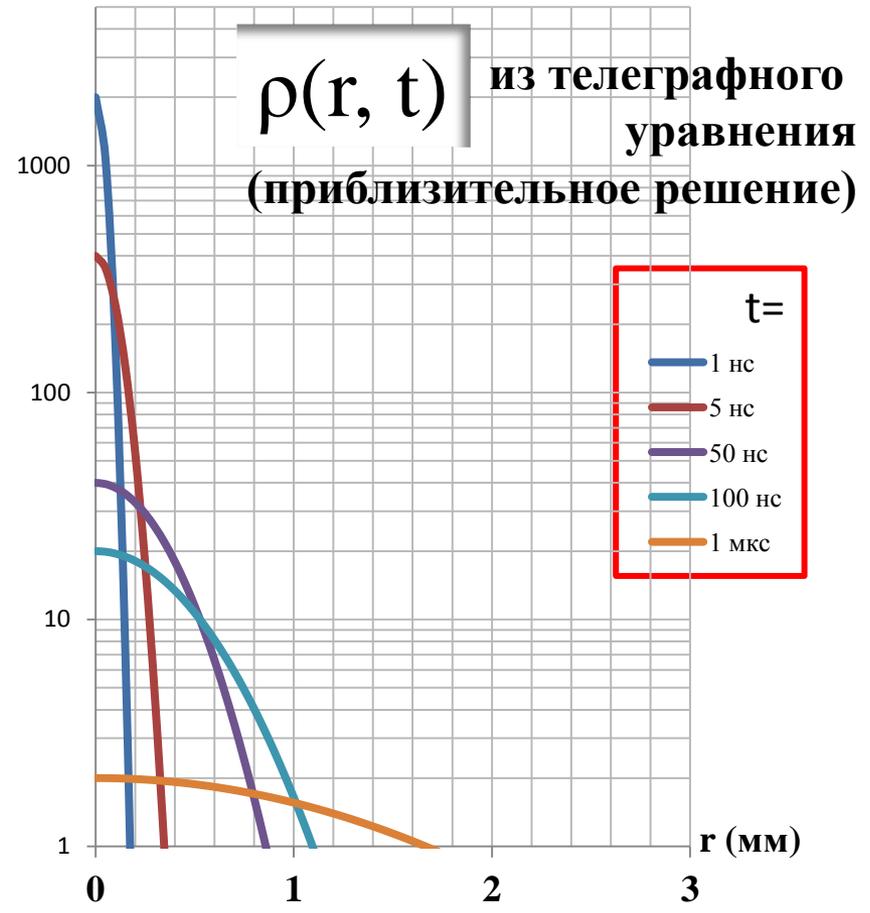
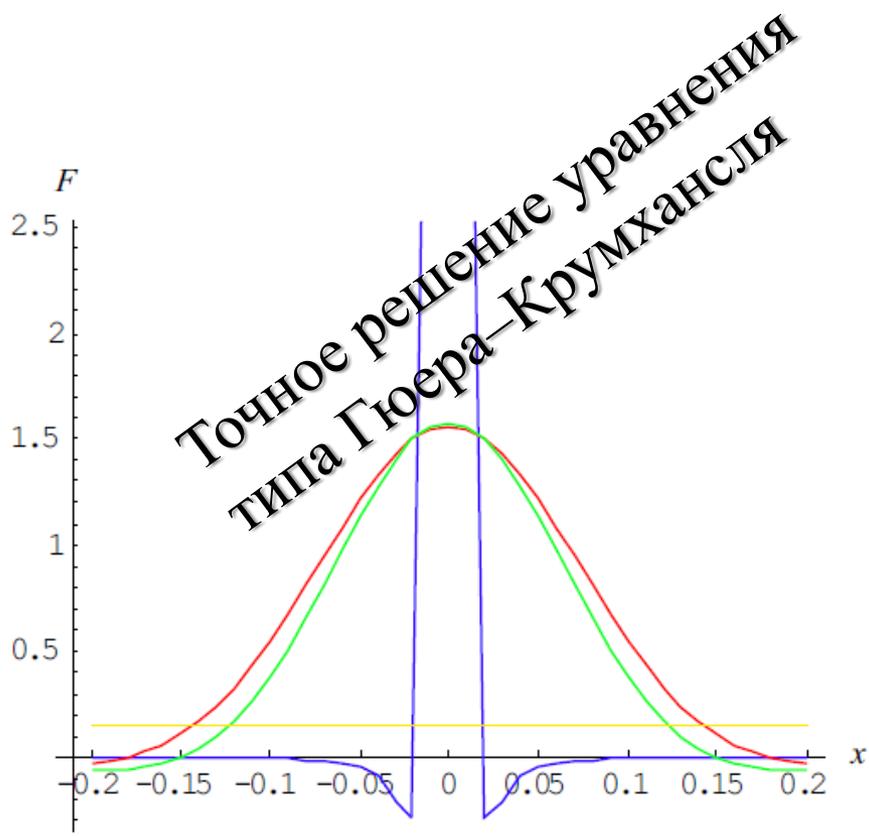
$$Z_1 + Z_2 = Z_1 + Z_3 = \frac{\frac{1}{pC} + R}{2 + pRC} \approx \frac{1}{p2C} + \frac{R}{2} \Big|_{pRC \ll 2, \omega \ll \frac{2}{\tau} \sim 300 \text{ кГц}}$$

$$\frac{\frac{1}{pC} + R}{2 + pRC} \approx \frac{\frac{1}{pC} + R}{pRC} = \frac{1}{pC} \left(\frac{1}{pRC} + 1 \right) \approx \frac{1}{pC} \Big|_{pRC \gg 2, \omega \gg \frac{2}{\tau} \sim 300 \text{ кГц}}$$

$$p = j\omega, \tau = RC, h = 1/\tau$$

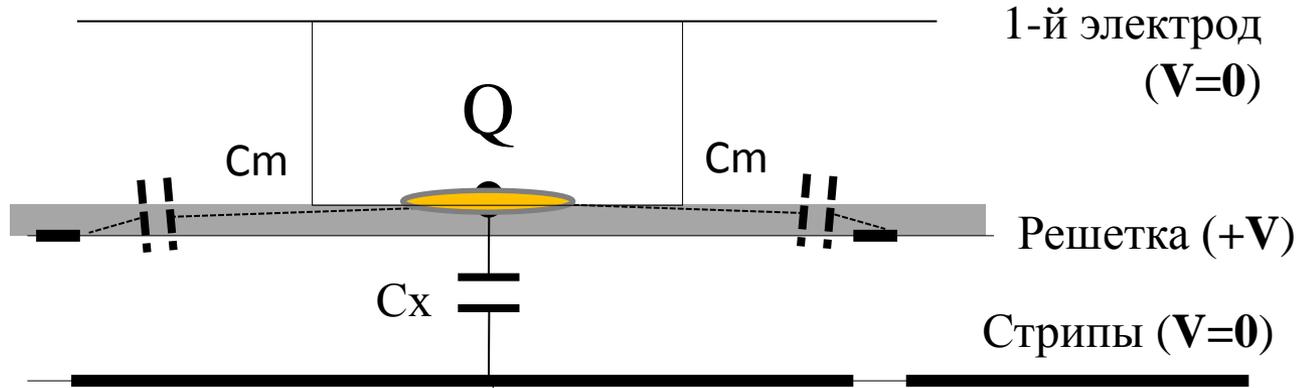
$$\tau = 1 \text{ мкс}, f_* \sim 300 \text{ кГц}$$

Заряд не растекается мгновенно: ЭВОЛЮЦИЯ изменения плотности заряда на резистивной поверхности тонкой пленки как функция координаты r (мм) и времени t (нс)



Эволюция импульса $\delta(x)$ в уравнении типа Г–К, К. Жуковский, МГУ №4, 1740301 (2017)

Динамическая емкость



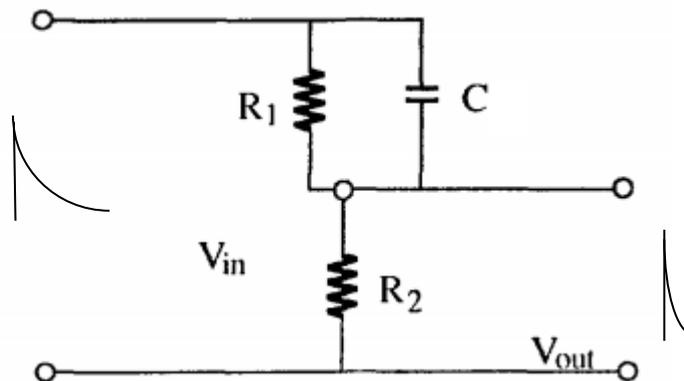
$$k = C_x / (C_m + C_x)$$

$k=1, C_m=0$
 $k=0.5, C_m \approx C_x$
 нет компенсации
 $k \ll 1, C_m \gg C_x$
 компенсация

- ✓ ... схема PZ-cancellation “встроена” в детектор
- ✓ амплитуда почти сохраняется (в известных схемах она подавляется в k раз)
- ✓ ... в k раз укорачивается любой хвост

Типовая схема компенсации полюса нулем

...встраивается в каждый канал ASIC для укорочения выходного импульса

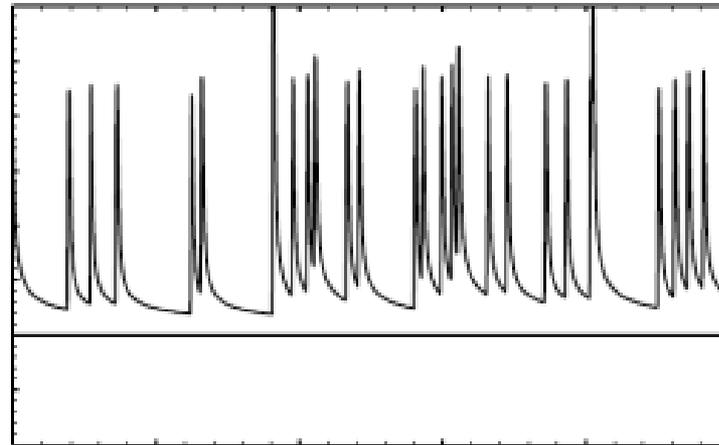


$$V_2 = \frac{V_1}{1 + pT} \cdot \frac{R_2}{R_2 + \frac{R_1 \frac{1}{pC}}{R_1 + \frac{1}{pC}}} = k \frac{V_1}{1 + pT} \cdot \frac{1 + pT_1}{1 + kpT_1}$$

$$T_1 = R_1 C, T_2 = kT_1 \ll T_1 \quad k = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \approx \frac{R_1}{R_2} \ll 1$$

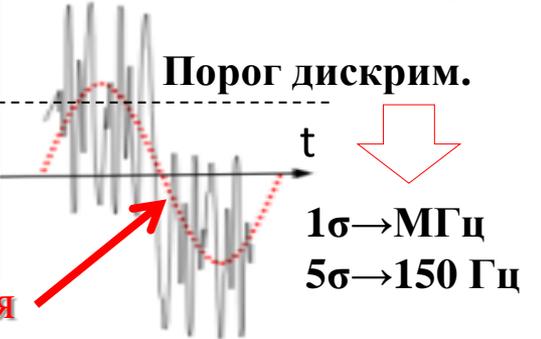
Зачем нужна компенсация “хвоста” ?

Наложением импульсов при недокомпенсации и перекомпенсации (с пересечением нуля) приводит к флуктуациям базовой линии (нулевого порога) и к существенному увеличению шумового счета



Нестабильная базовая линия

Шум – случайный процесс (Гаусс)



Порог дискрим.

t

1σ → МГц

5σ → 150 Гц

Стабильная базовая линия

V=0



ВЫСОКАЯ НАДЕЖНОСТЬ

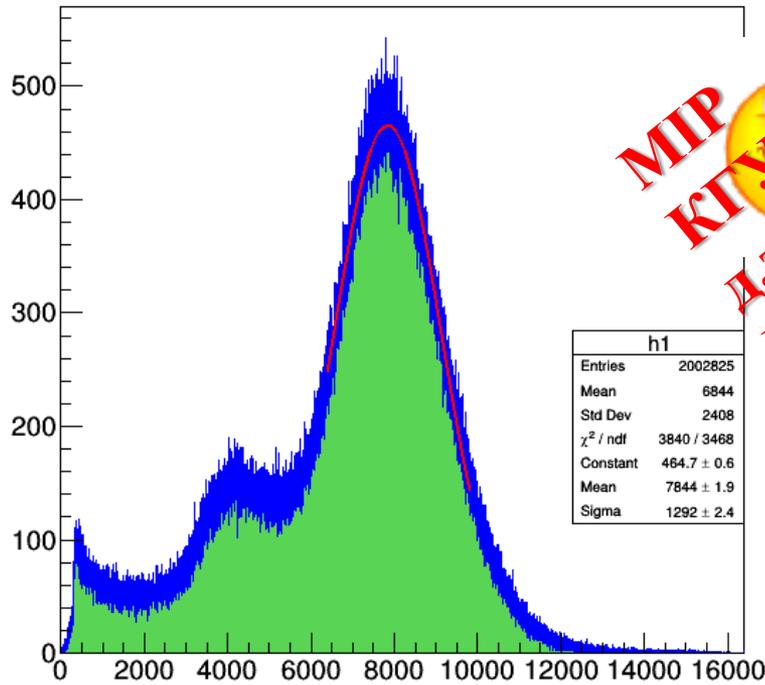
Спектры Fe-55 слева, измеренные при КГУ=30 тысяч сразу при включении,
а справа

после выдержки в режиме пробоев ~ 0.5 млн. пробоев

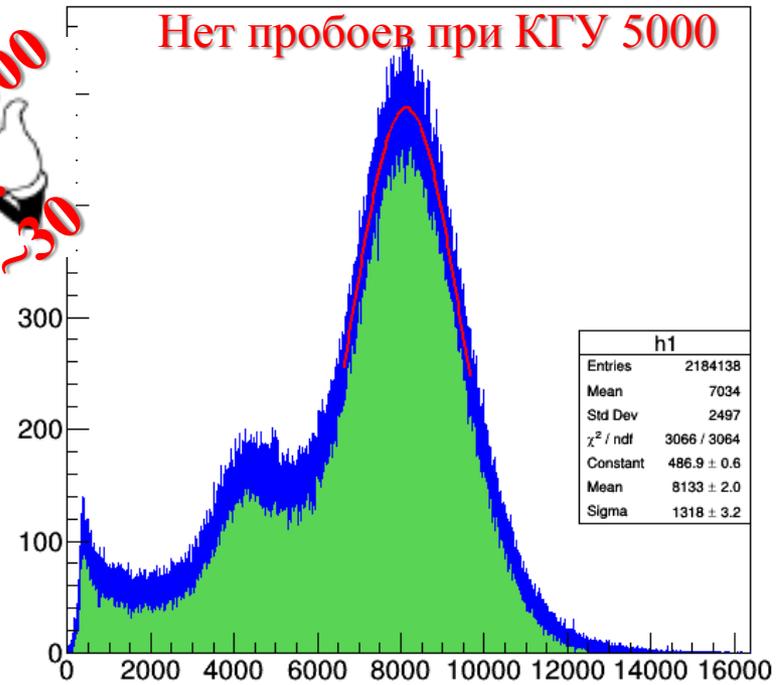
C=1000 пФ, V=1435 В

Толщина DLC 120 нм ($R \approx 25 \text{ МОм}/\square$).

dlc12_grid1_top_1435v.txt



dlc12_grid1_top_1435v_2.txt



Пленка DLC работала не меньше 7-8 часов с пробоями...

Визуально и под микроскопом никаких изменений не замечено.

Сопротивление не изменилось.

+++

Резистивный каптон (черный) = органика в аналогичном *сетапе* за это время прогорел насквозь.

Часть IV

Примеры применения колодезного ГЭУ на БАК и ПИК

Frascati (LNF): financial Request (μ -RWELL, 2017)

GOAL: n. 2 M2R1 - like size - 25x30 cm²
 0.6x0.8 cm² pad size
 1500 chs/gap, partially instrumented w/VFAT2

Costs Estimate:

| | |
|---|--------------|
| <input type="checkbox"/> DLCed foil 50 μ m thick (ampl.stage + 1 st res-layer) + 25 μ m thick 2 nd res-layer(Japan): | 1 k€ |
| <input type="checkbox"/> Preliminary tests of double resistive-layer (on 10x10 cm ²): | 2 k€ |
| <input type="checkbox"/> n.2 M2R1-like protos (including DRIFT electrodes & frames): | 6 k€ |
| <input type="checkbox"/> fee (n. 500 chs – 4 VFAT2 boards) + TURBO board: | 1 k€ |
| | <hr/> |
| | 10 k€ |
| <input type="checkbox"/> Missioni (contacts with TECHTRA/ELTOS) : | 4 k€ |
| <input type="checkbox"/> Test Beam (4 people – 2 weeks) | 8 k€ |
| | <hr/> |
| | 12 k€ |

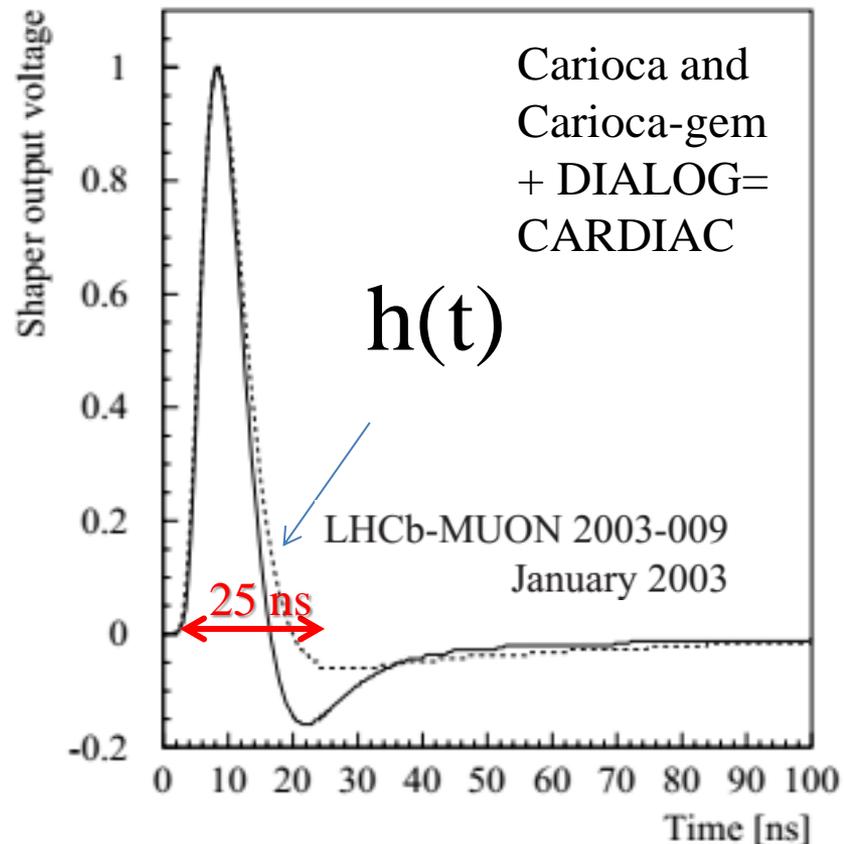
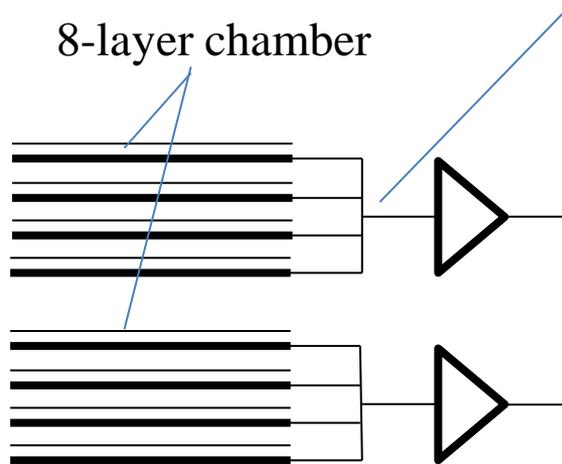
M2/3R1 LHCb-muon upgrade project

based on extension of “bigap” concept by wire-OR developed at PNPI for MWPC-muon

Dead time reduction by reduction of the collection time with thin gap

Pulse width to be within 25 ns - bunch crossing at 40 MHz LHC

MPGD-RWELL Single gap ~1m
@ 4 wire-OR + 2 logic.



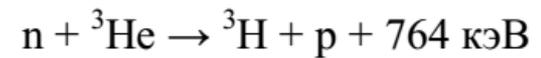
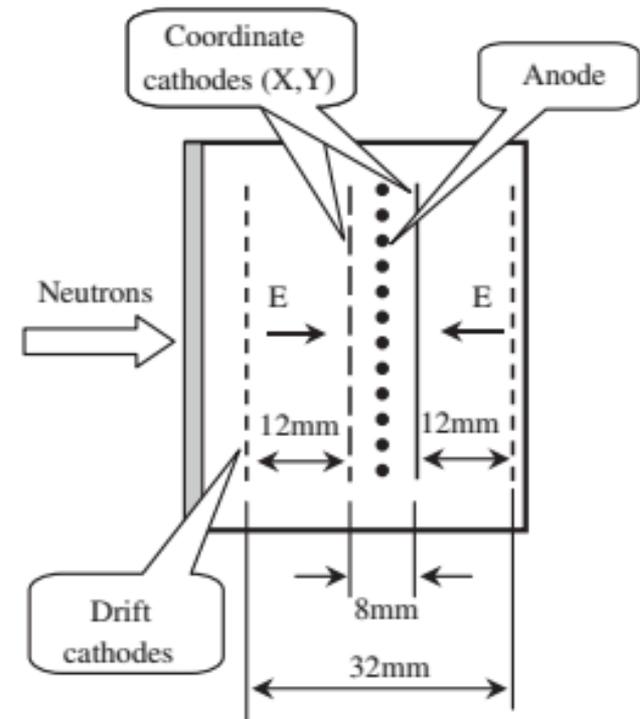
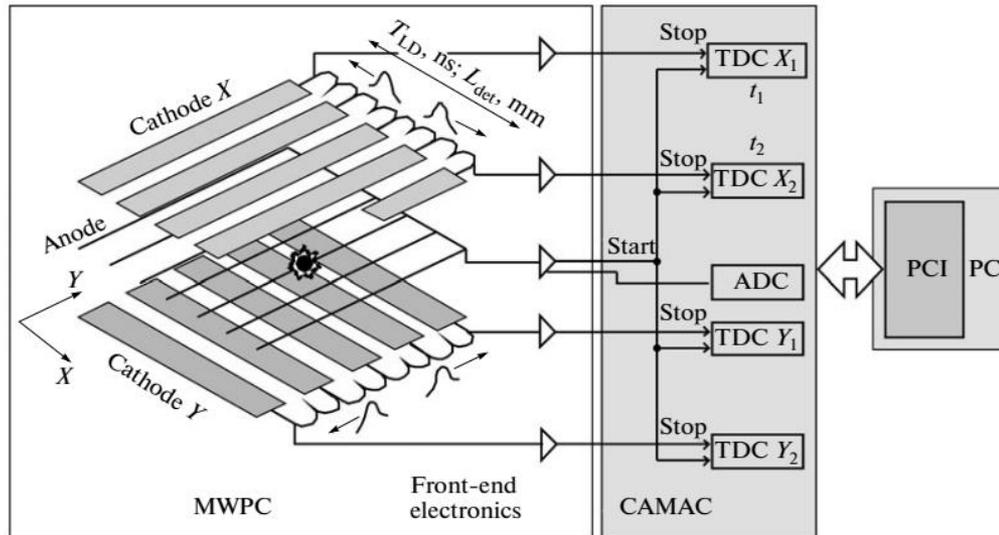
ПИК

Детекторы тепловых и холодных нейтронов для
дифрактометров
(кольцевых, малоугловых, рефлектометров)

Gas-Filled Position-Sensitive Detectors of Thermal Neutrons at the Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute of the Russian Academy of Sciences

REFERENCES

1. V. Andreev, G. Ganzha, D. Ilyin, E. Ivanov, S. Kovalenko, A. Krivshich, A. Nadtochy, and V. Runov, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **581**, 123 (2007).
2. V. A. Andreev, E. A. Ivanov, D. S. Ilyin, S. N. Kovalenko, A. G. Krivshich, A. V. Nadtochy, and V. V. Runov, Izv. Akad. Nauk, Ser. Fiz. **72** (7), 1059 (2008) [Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. **72** (7), 1001 (2008)].
3. V. A. Andreev, G. A. Ganzha, E. A. Ivanov, D. S. Ilyin, S. N. Kovalenko, A. G. Krivshich, A. V. Nadtochy, and V. V. Runov, Preprint No. 2780, PIYaF (Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina, Leningradskaya oblast, Russia, 2008).

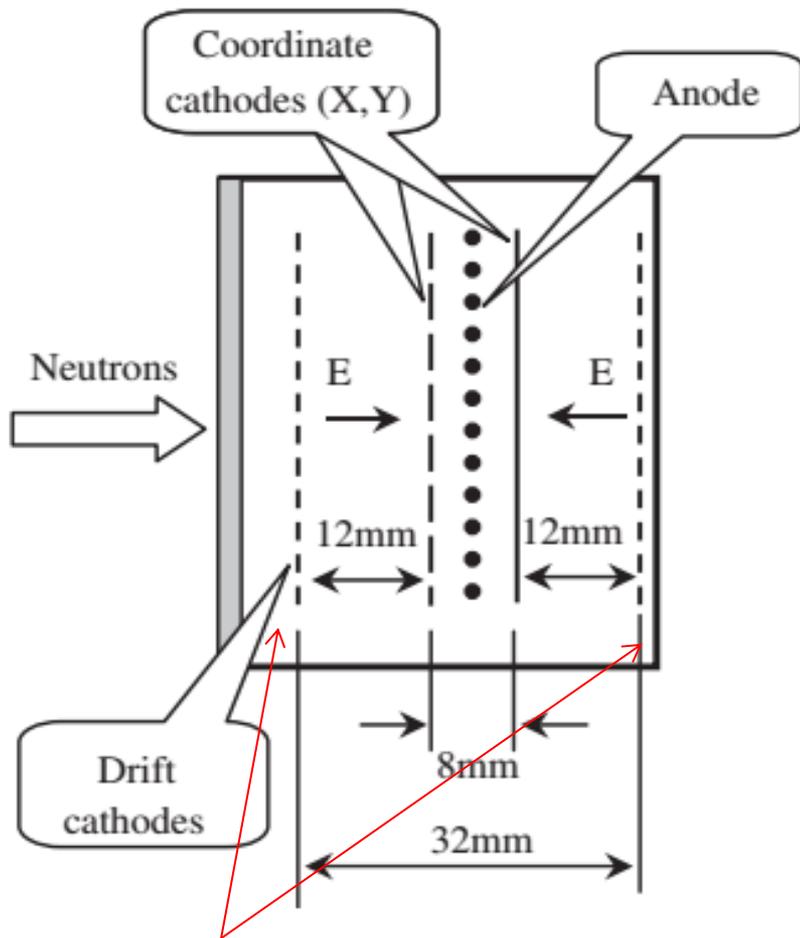


1.5 bar ${}^3\text{He}$ + 2 bar CF_4
efficiency 60% for 9 Å
resolution of 2.5 mm

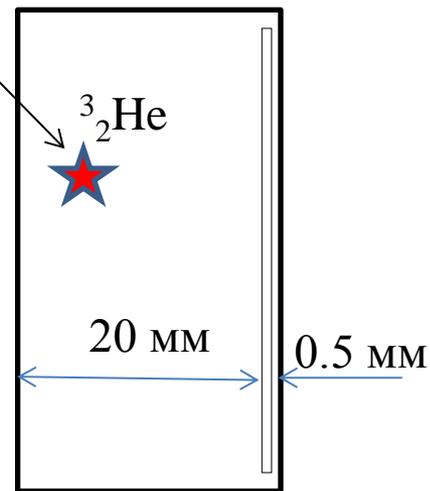
Зачем 5 проволочных электродов ?

КОГДА МОЖНО 3, 2, 1 и 0 проволочных электродов !

V. Andreev and al., N.I.M A 581 (2007) 123–127



Захват нейтрона ядром гелия (764 кэВ)



↑ Резистивный электрод (пленка) + 2D счит. электрод

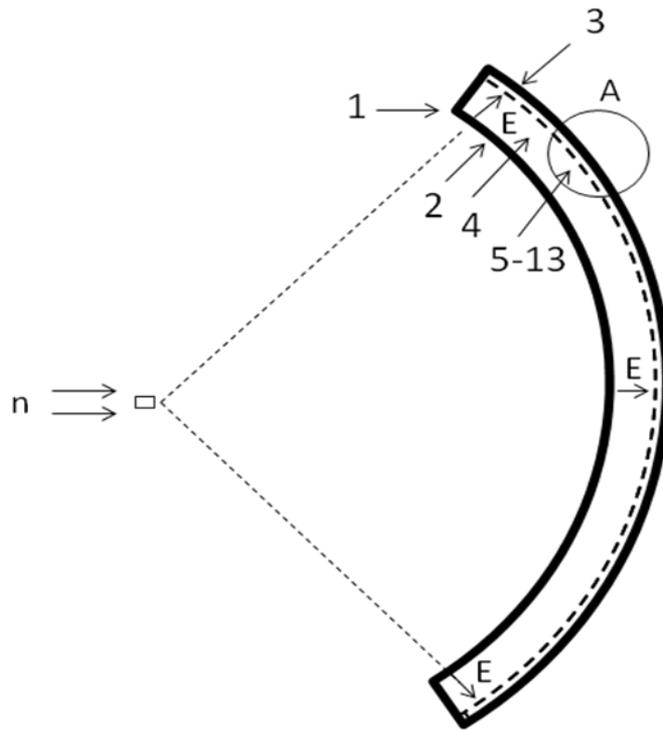
Мертвые области (карманы), потеря гелия ~ 25%, зачем?

То, о чем говорилось 16-17 мая 2018 (Петергоф)

СТАРО !

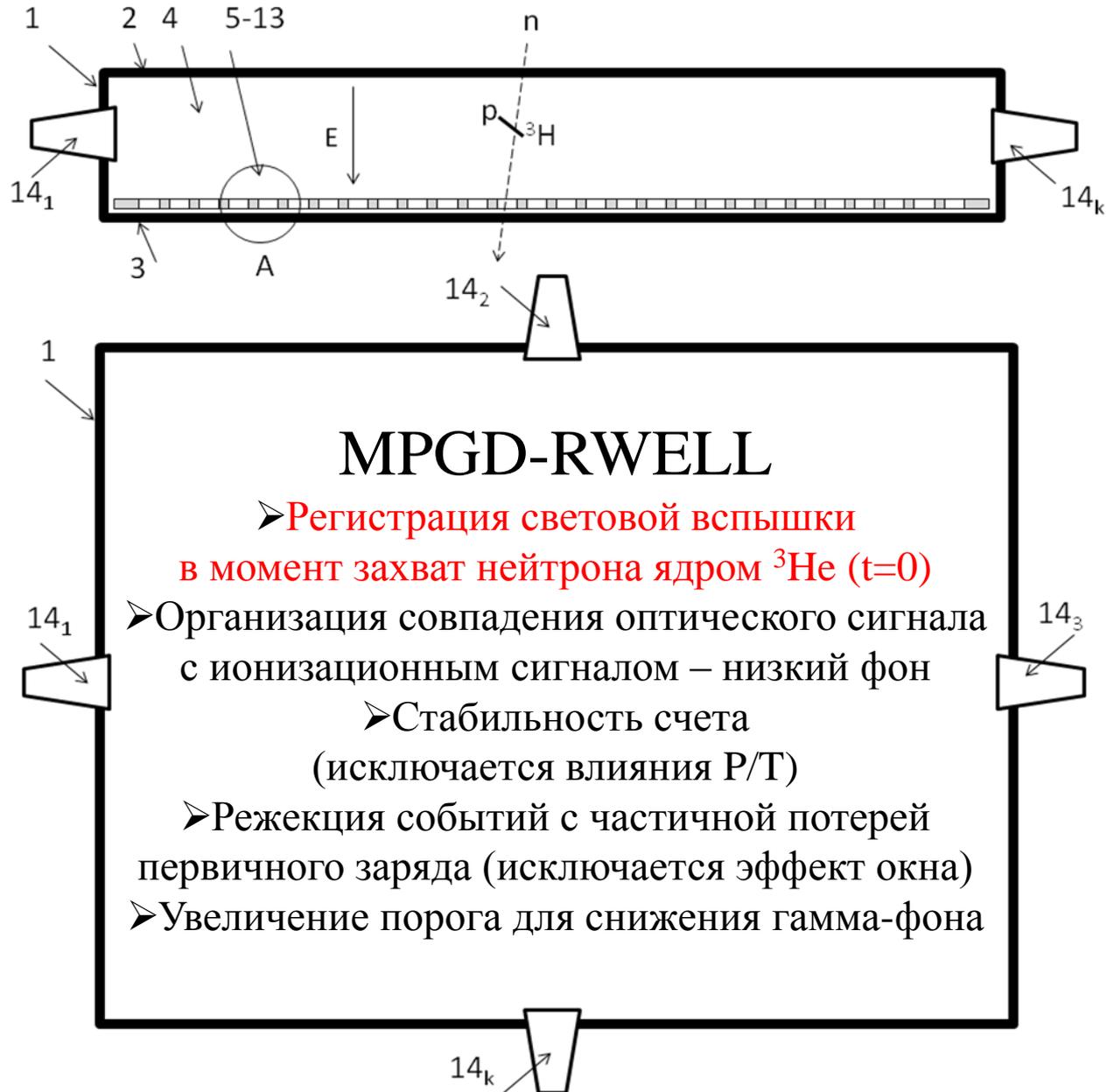


Проект двухкоординатного детектора т.х.н. модульной конструкции без параллакса по X и Y (со сферическим изгибом детектирующей поверхности), выполненный на базе MPGD-RWELL



Усиление в отверстиях не меняется при изгибе детектирующей поверхности

Бинарная смесь $^3\text{He}/\text{CF}_4$ – низкофоновый детектор

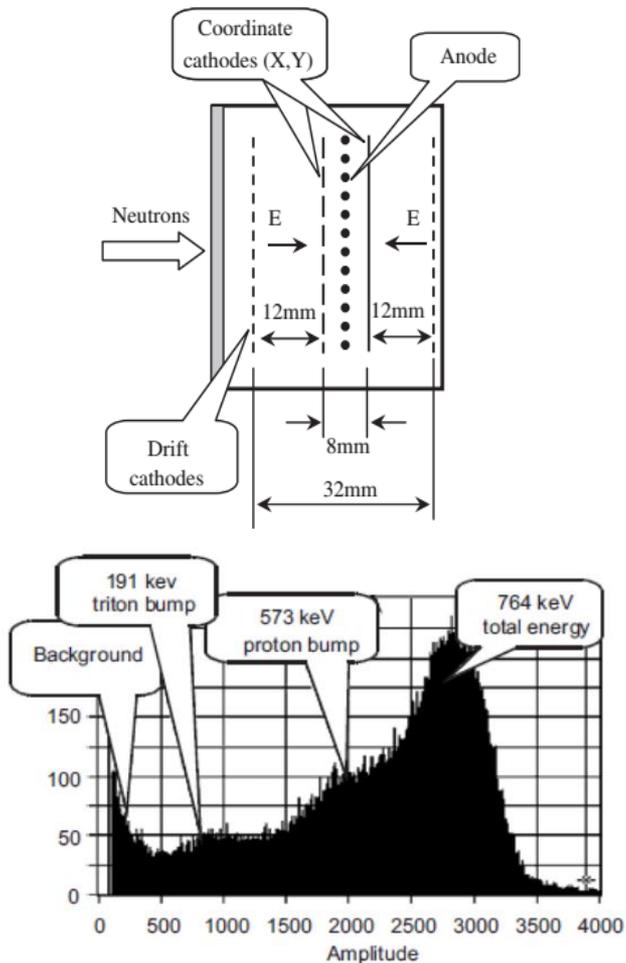


Сравним спектры с ионизационной камерой

Nucl. Instr. and Meth. A 581. 2007. P. 123–127.

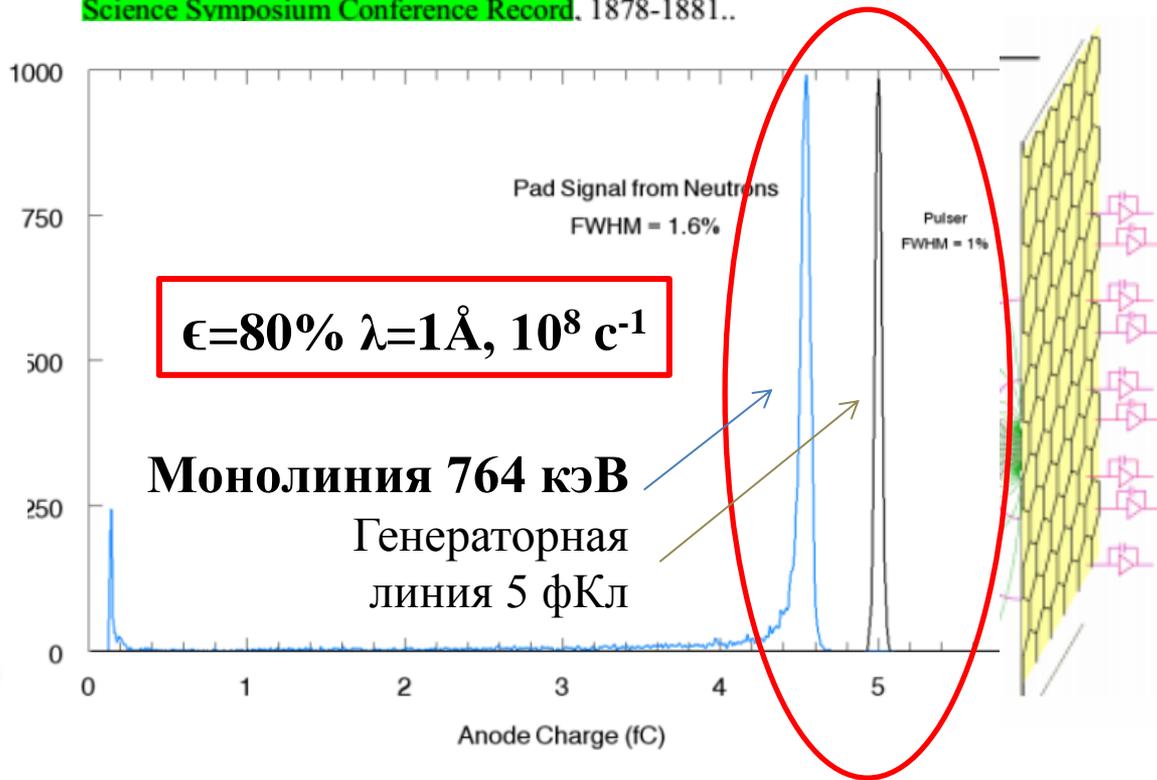
Ионизационная камера без сетки Фриша (BNL)

B. Yu, N. A. Schaknowski, G. C. Smith, G. De Geronimo, E. O. Vernon, L. G. Clonts, C. L. Britton and S. S. Frank, Thermal Neutron Detectors with Discrete Anode Pad Readout, **2008 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record**, 1878-1881..

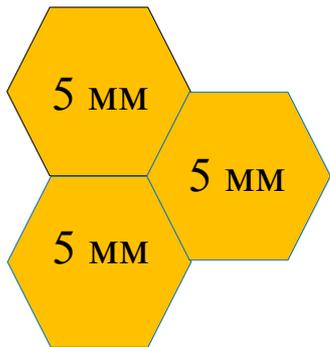


$\epsilon=60\% \lambda=9\text{\AA}, 10^5 \text{ c}^{-1}$

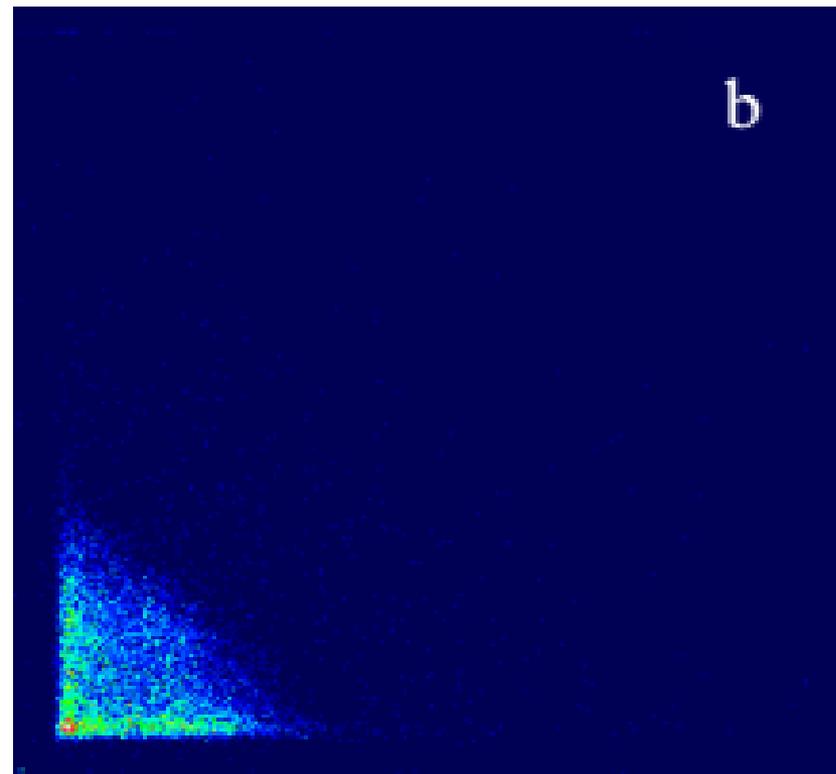
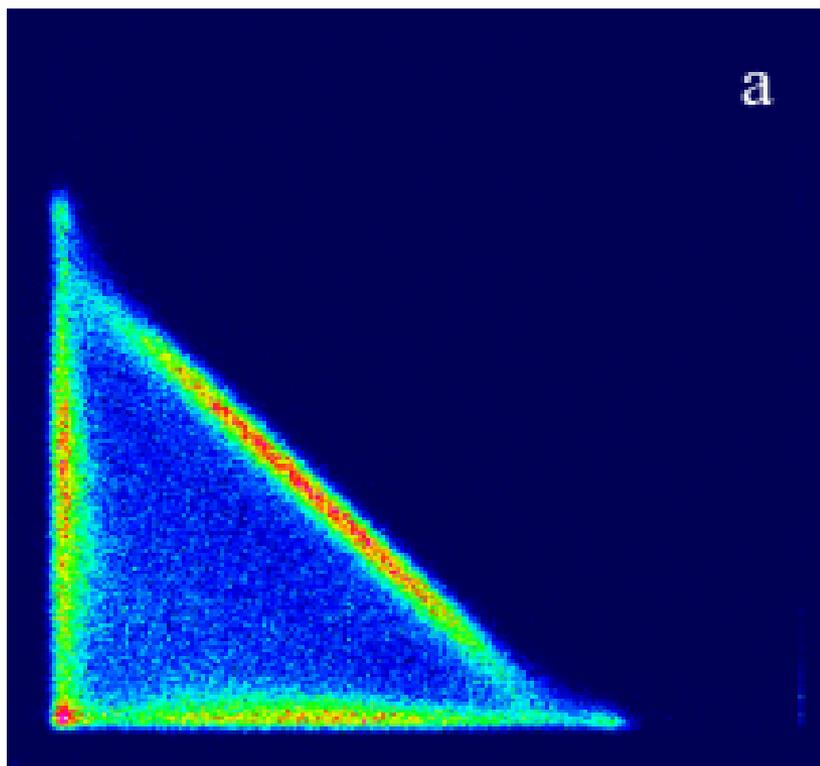
5 электродов



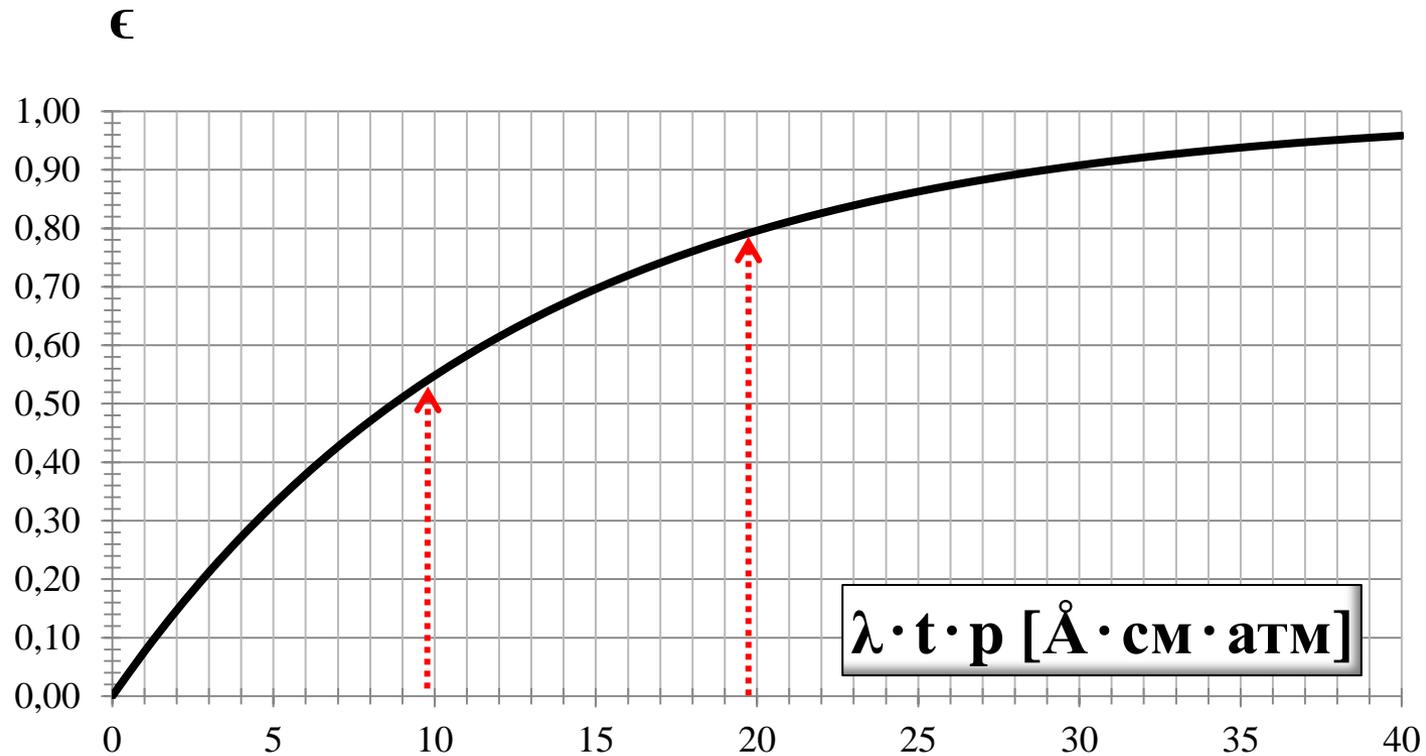
1 электрод



a – распределение амплитуд импульсов на двух смежных пэдах;
b – двух несмежных пэдах ,
полученные при различной ориентации первичных треков



Эффективность



$t=2\text{cm}$, $p=10\text{atm}$

$\epsilon=80\%$ @ $\lambda=1\text{\AA}$

$\epsilon=50\%$ @ $\lambda=0.5\text{\AA}$ при пространственном разр. 2.5 мм (FWHM)

Металлические 2D-трубки с гелием под давлением

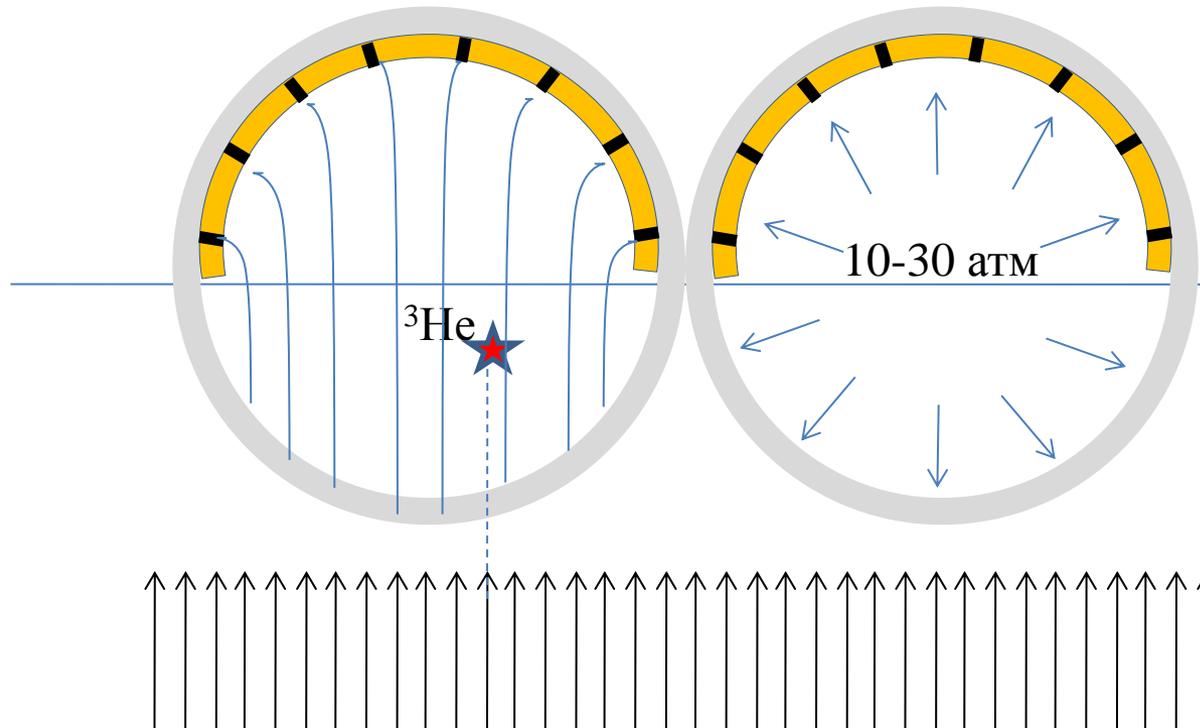
Нет центральной проволоочки - заменена цепочками отверстий

Увеличение светосилы в 10 раз

Суб-мм разрешение по X и Y

Без параллакса в вертикальном направлении

Высокая ремонтпригодность мульти-детектора заменой трубки...



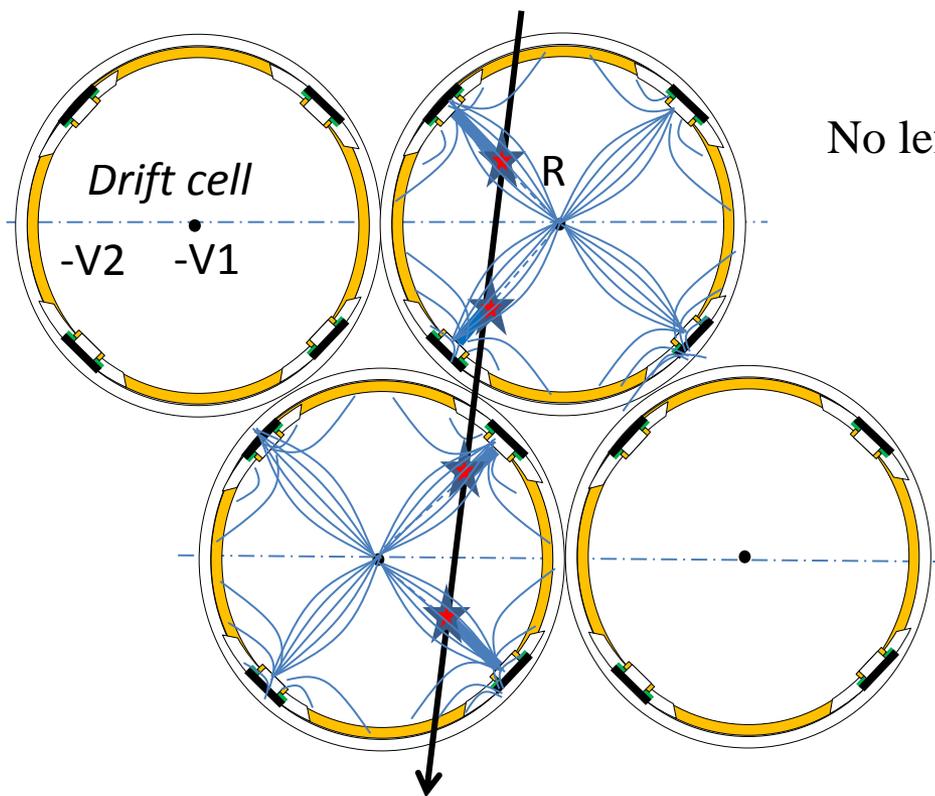
X и Y-стрипы
находятся
за резист. слоем DLC
при $V=0$,
соединены в ЛЗ
для определения
номера сраб. отверстия

нейтроны

Новые дрейфовые строу-трубки без сагитты

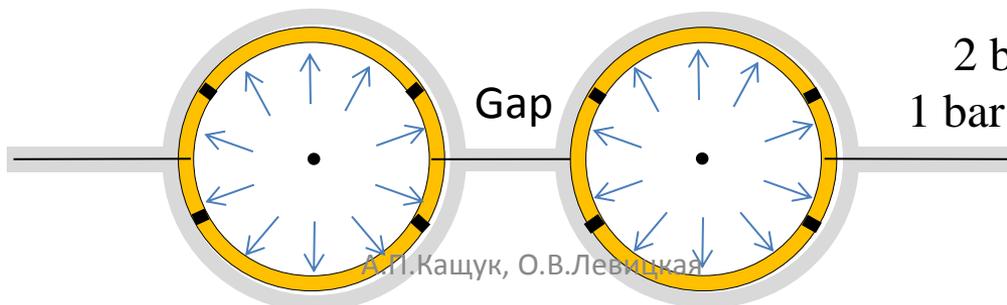
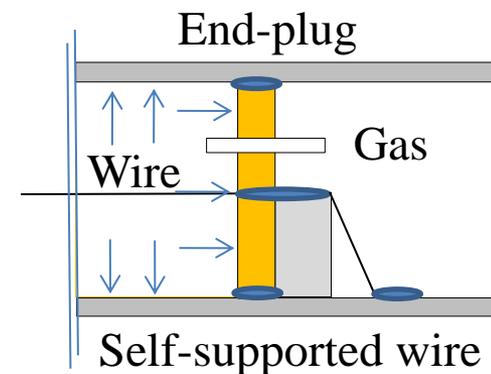
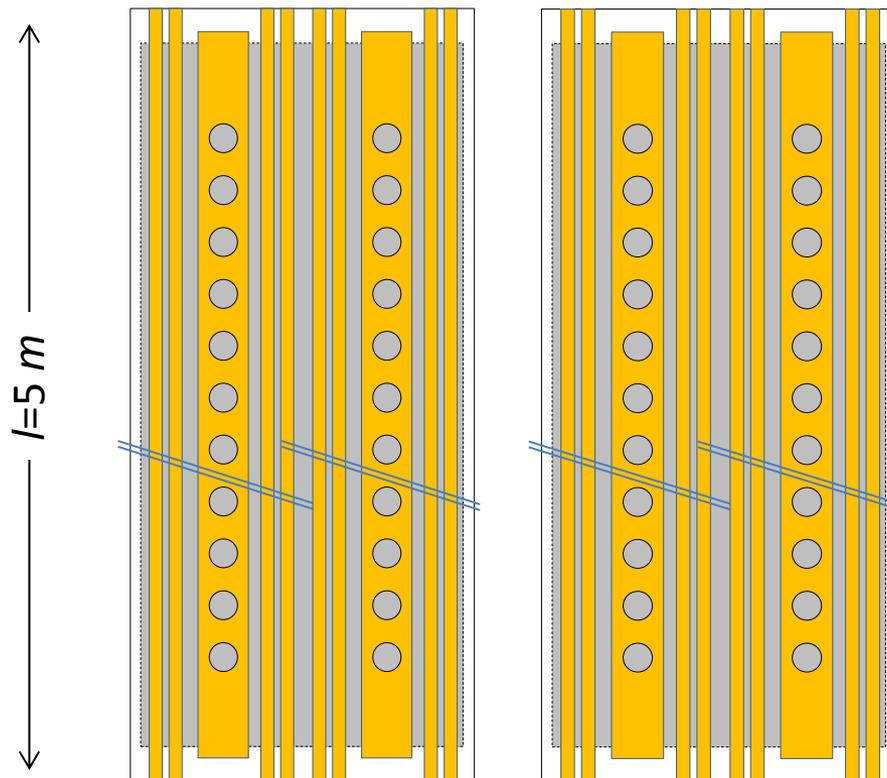
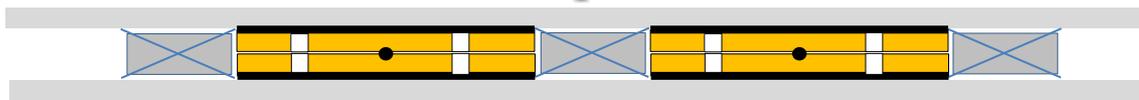
The μ -wire (amplification element) is replaced to **the string of μ -holes along tube**

Here the central wire is a cathode - drift electrode



No sagitta
No left-right ambiguity
Multihit

Печатная технология изготовления трубок в виде ламинированных матов



Pressure:
2 bar inside at **stockage**
1 bar at operation in vacuum

СПАСИБО за ВНИМАНИЕ