



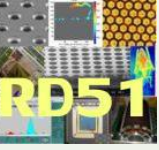
Development of the Focusing Aerogel Ring Imaging Detector for the upgrade ALICE

А.И. Решетин

*от имени Научной группы ИЯИ РАН – участника
Международной Коллаборации RD-51 в ЦЕРН*



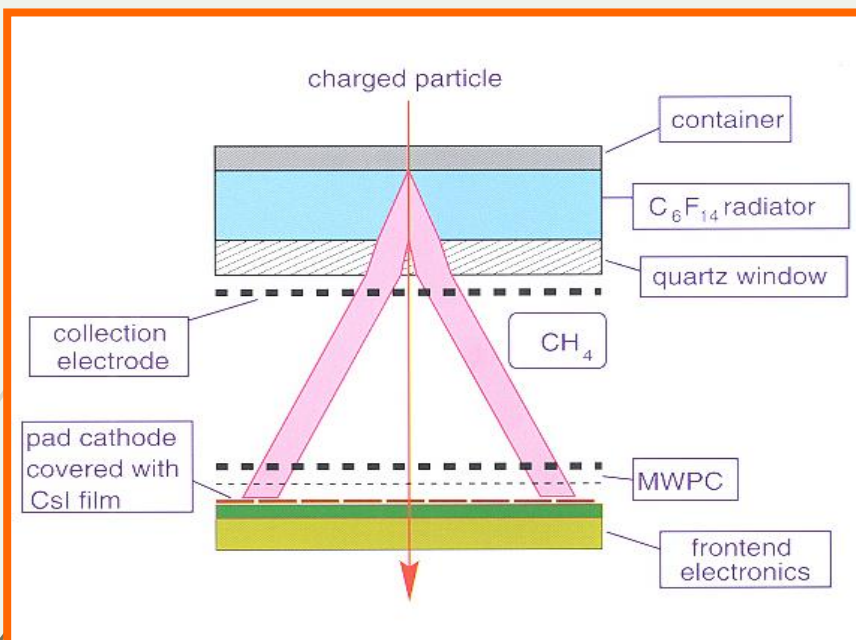
Оглавление



- ☉ FARICH (Focusing Aerogel RICH-детектор): концепция
- ☉ FARICH-Прототип-1 с MRS лавинными фото-диодами – конструкция
- ☉ Испытания FARICH Прототипа-1 на тестовых пучках в ЦЕРН
- ☉ Испытания FARICH Прототипа-2 с цифровым-SiPM считыванием на тестовых пучках в ЦЕРН
- ☉ Результаты испытаний FARICH Прототипа-2 с цифровым-SiPM считыванием
- ☉ Aerogel-RICH Проект – «ALICE-3, 2024-2032 гг.»



ALICE HMPID-system at CERN



ALICE HMPID-system performances (Results of HMPID beam test runs at CERN):

- On an average 16 pe / ring per event track
- Single photon resolution – about 12 mrad
- Cherenkov angle resolution – about 4 mrad
- Particle identification:

π/K separation

in the momentum range from 1 to 3 GeV/c

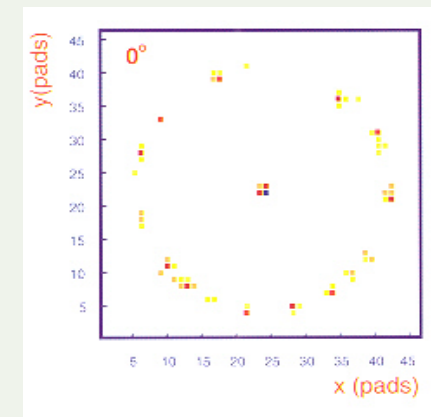
K/p separation

in the momentum range from 1.5 to 5 GeV/c

ALICE HMPID-system

uses the proximity type geometry without focusing,
consists of:

- container with liquid C_6F_{14} radiator ($n = 1.26$) and quartz window
- photosensitive detector on the basis of MWPC with CsI-photocathode plane segmented into the pad readout structure
(sizes of the pad are 8 x 8.4 mm)



Rings measured during the HMPID beam test run



Мы представляем концепцию FARICH-детектора (Focusing Aerogel RICH-detector), основанную на исследованиях 2009-2014 гг. для модернизации системы идентификации частиц в эксперименте ALICE в ЦЕРН.

На “ALICE 3: First workshop on physics and detector” (ЦЕРН, октябрь 2020 г.) был предложен новый Aerogel-RICH проект для ALICE 3 Upgrade (Antonello Di Mauro в сотрудничестве с ИЯИ РАН).

Цель проектов состоит в разработке Прототипа детектора для идентификации заряженных частиц в расширенном диапазоне значений поперечного импульса: до 10 GeV/c для пион-каонного разделения и до 14 GeV/c для каон-протонного разделения в ALICE HMPID системе [1, 2].

FARICH-детектор для эксперимента ALICE предложил проф. А.Б. Курепин (ИЯИ РАН, Москва) в 2008 г.

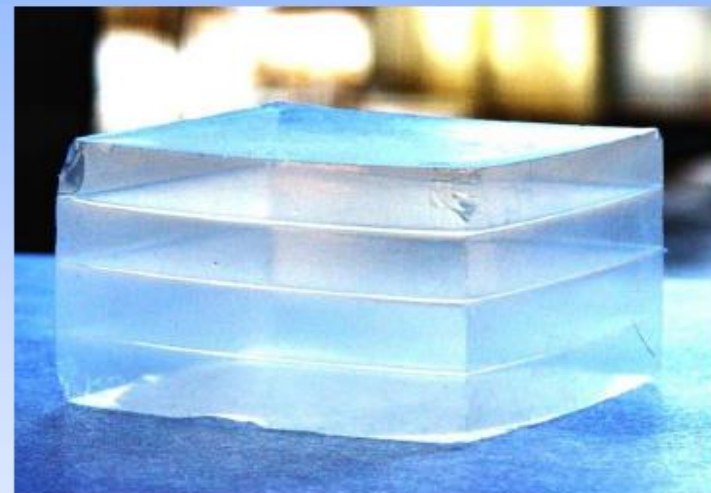
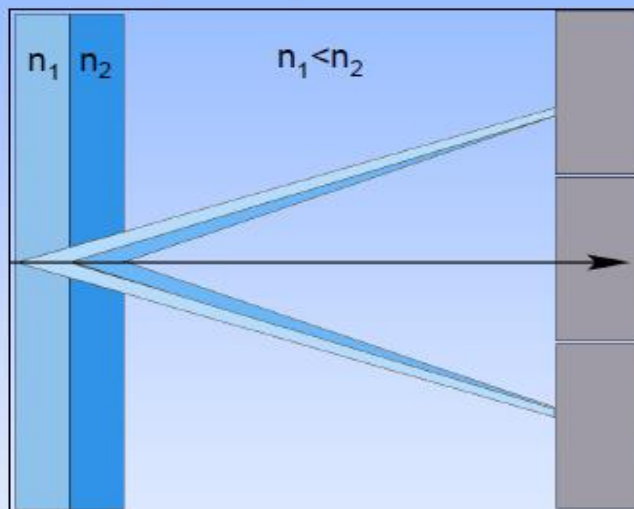
В рамках этого проекта мы разработали и испытали Прототип FARICH-детектора на основе многослойного кремниевого аэрогеля в качестве радиатора излучения Черенкова. В июне 2012 г. мы испытали FARICH-прототип с применением Цифровых Фотонных Счётчиков (DPC-DSiPM) by Phillips Company на PS T10 тестовом пучковом канале в ЦЕРН при значениях импульса частиц пучка до 6 GeV/c [3, 4].

References

1. Development of FARICH-detector for ALICE experiment at CERN A.I. Berlev (Moscow, INR) et al., 2009. 4 pp. Published in Nucl.Instrum.Meth. **A598 (2009)** 156-159.
2. A Very High Momentum Particle Identification Detector (VHMPID) for ALICE. Letter of Intent, Version 19.0, ALICE VHMPID Upgrade, 2012. electronic version <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/Sandbox/VHMPIDLoI>
3. Beam test of FARICH prototype with Digital Photon Counter A.Yu. Barnyakov (Novosibirsk, IYF) et al., 2013. 5 pp. Published in Nucl.Instrum.Meth. **A732 (2013)** 352-356.
4. Tests of FARICH prototype with precise photon position detection. A.Yu. Barnyakov (Novosibirsk, IYF) et al., 2014. 4 pp. Published in Nucl.Instrum.Meth. **A766 (2014)** 88-91.

FARICH-концепция

Focusing Aerogel RICH: RICH with multilayer aerogel radiator



Improvement of the Cherenkov angle measurement accuracy as compared to single layer is achieved by the reduction of the contribution from the thickness of the radiator in the error.

Основная цель FARICH-концепции:

- увеличение числа черенковских фотонов при использовании более толстого Aerogel-радиатора;
- применение нескольких слоёв аэрогелевого радиатора для фокусировки конусов Черенкова на детекторную фото-чувствительную плоскость без деградации углового разрешения.



Теоретическое обоснование FARICH-Проекта в 2008 -2014 гг.

The experimental study of ultra-relativistic heavy ion collisions at PHENIX and STAR (RHIC, BNL) [1,2] shows the unexpected suppression of the inclusive high- P_T particle yields — neutral pions and charged hadrons in central Au–Au collisions at $P_T > 2$ GeV/c. At the same time, the more recent experimental data at PHENIX (RHIC) [3,4] give the evidence of a large enhancement of baryons and anti-baryons relative to pions at $P_T > 2–5$ GeV/c by almost a factor of three.

This experimental fact is called “baryon puzzle” or “jet quenching effect” at RHIC.

Among the most popular theoretical models of the observable suppression of hadrons are those based on recombination of quarks [5,6]. Other approaches predict that “jet quenching effect” gives the indication on a different loss of energy by partons and gluons in the compressed nuclear matter.

Основной вывод: для детального исследования явления “baryon puzzle” or “jet quenching effect”, экспериментально обнаруженного на RHIC, необходимо расширить способность идентификации частиц в PID-системах до значений поперечного импульса более 10 GeV/c.

References

- [1] K. Adcox, PHENIX Collab., et al., Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 022301.
- [2] C. Adler, STAR Collab., et al., Phys. Rev. Lett. 89 (2002) 202301.
- [3] S.S. Adler, PHENIX Collab., et al., Phys. Rev. C 69 (2004) 034909.
- [4] S.S. Adler, PHENIX Collab., et al., Phys. Rev. Lett. 91 (2003) 172301.
- [5] R.J. Fries, et al., Phys. Rev. Lett. 90 (2003) 202303.
- [6] R.J. Fries, et al., Phys. Rev. C 68 (2003) 044902.



Development of FARICH-detector for the ALICE experiment at CERN

A.I.Berlev, T.L.Karavicheva, E.V.Karpechev,
Yu.V.Kupchinskiy, A.B.Kurepin, A.N.Kurepin, A.I.Maevskaya,
Yu.V.Musienko, V.I.Razin, A.I.Reshetin, D.A.Finogeev
*Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia*

A.F.Danilyuk, V.L.Kirillov
Boreshkov Institute of Catalysis

S.A.Kononov, E.A.Kravchenko, A.P.Onuchin
*Budker Institute of Nuclear Physics,
Novosibirsk, Russia*

Feb.27 – March5, 2008 Development of FARICH-detector for the ALICE experiment at CERN Andrey Reshetin
INSTR08, Novosibirsk, RUSSIA (slide 1) Institute for Nuclear Research, Moscow

Разработка и результаты испытаний FARICH Прототипа-1 на тестовых пучках в ЦЕРН для эксперимента ALICE были доложены на Конференции INSTR08 в БИЯФ СОАН (г. Новосибирск) в 2008 г.



Проект FARICH-Прототипа был основан на 2-х разработках фото-чувствительной матрицы:

- 1. MRS APD Лавинные фото-диоды – 1-я опция.**
- 2. Цифровые Фотонные Счётчики (Philips, Aachen, Germany) digital SiPMs – 2-я опция**

В течение 2007-2011 гг. мы разработали и испытали FARICH-Прототип-1 с фото-чувствительной матрицей на основе MRS APD, состоящий из следующих конструкционных частей:

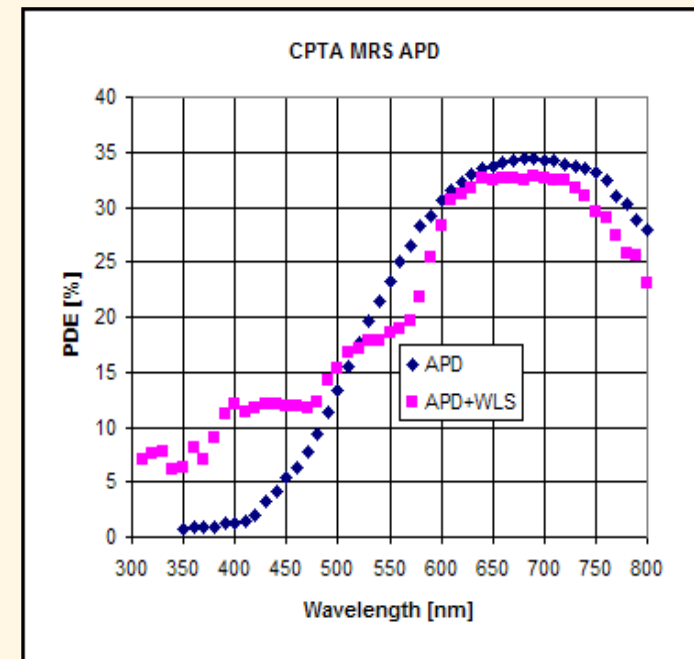
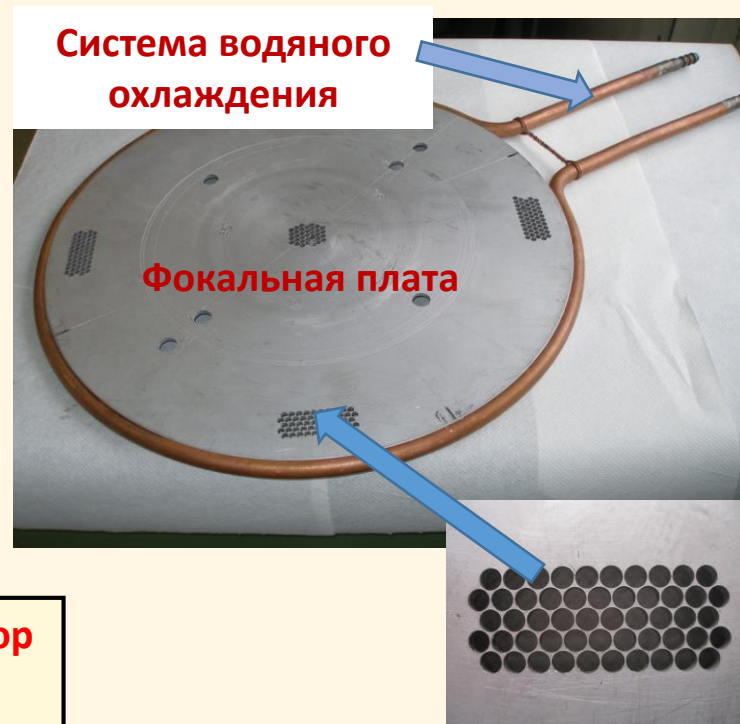
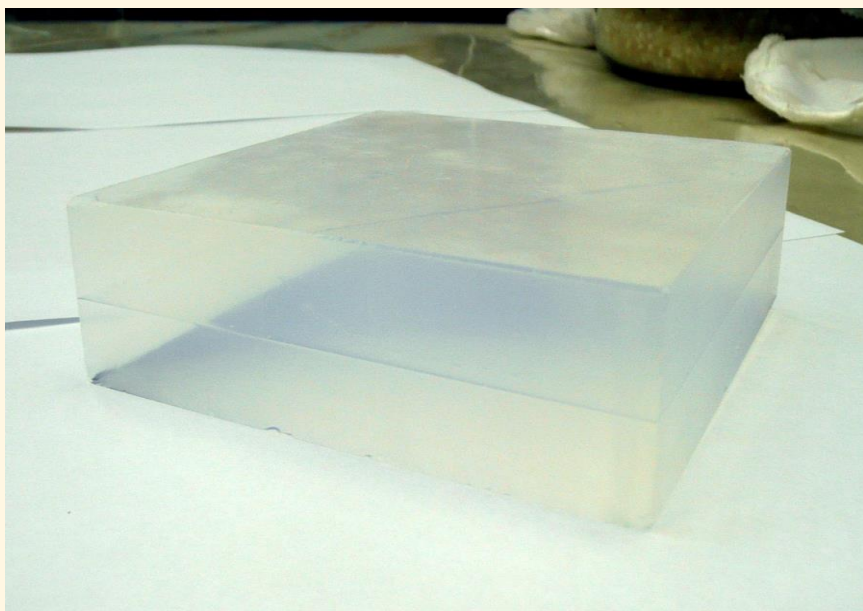
-
- 1) свето-изоляционного корпуса размерами 400 x 400 x 1000 мм;**
 - 2) тонкого углеродного входного окна для частиц пучка;**
 - 3) двухслойного фокусирующего аэрогельного радиатора излучение Черенкова размерами 120 x 120 x 31 mm, изготовленного в Институте Катализа в г. Новосибирске;**
 - 4) фокальной платы из алюминия с Winston-конусными отверстиями;**
 - 5) фото-чувствительной матрицы с MRS Лавинными фото-диодами: 100 APDs – на окружности и 25 APDs – в центре;**
 - 6) системы водяного охлаждения;**
 - 7) Time Readout Board (TRB) на базе NINO-chip процессора.**

FARICH-Прототип-1 конструкционные части:

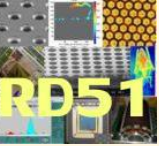
Радиатор фотонов Черенкова –
двухслойный кремниевый
аэрогель, изготовленный в
г. Новосибирске

Фокальная плата с матрицей
отверстий для монтажа 240 MRS APDs
5 матричных секторов:
1 сектор – центральный,
4 сектора – “on ring”

MRS APDs (изготовлены в СРТА, Москва).
Зависимость PDE [%] от длины волны
фотонов Черенкова



Фокусирующий двухслойный AEROGEL-радиатор
с коэффициентами преломления
 $n_1 = 1.0453$; $n_2 = 1.0470$



Моделирование характеристик многослойного фокусирующего радиатора на основе аэрогеля для FARICH-детектора

Результаты моделирования для импульса 10 GeV/c

Radiator version	N layers	T total mm	N _{pe}	r, мм	$\sigma_{r, 1pe}$, мм	Ring area, mm ² (+/- 3 σ)	$\sigma(\theta)$, mrad	π/K sep, σ
n=1.03	1	23.5	15	120.5	1.9	8.63E+03	0.92	4.9
	2	33.1	20	121.3	1.5	6.86E+03	0.65	7.1
	3	45.8	26	121.5	1.4	6.41E+03	0.53	8.7
n=1.03 with WLS	1	38.5	29	118.6	3.1	1.39E+04	1.10	4.2
	2	52.6	35	120.1	2.5	1.13E+04	0.81	5.6
n = 1.05	1	22.3	24	156.5	2.5	1.48E+04	0.91	3.9
	2	35.6	35	157.2	2.0	1.19E+04	0.61	5.8
	3	50.0	47	157.4	1.9	1.13E+04	0.49	7.2
n=1.05 with WLS	1	40.2	49	153.6	4.1	2.37E+04	1.04	3.4

where:

r is the average radius of the Cherenkov ring;

$\sigma_{r, 1pe}$ is the mean deviation of the Cherenkov radius (for single photon).

S is the ring area;

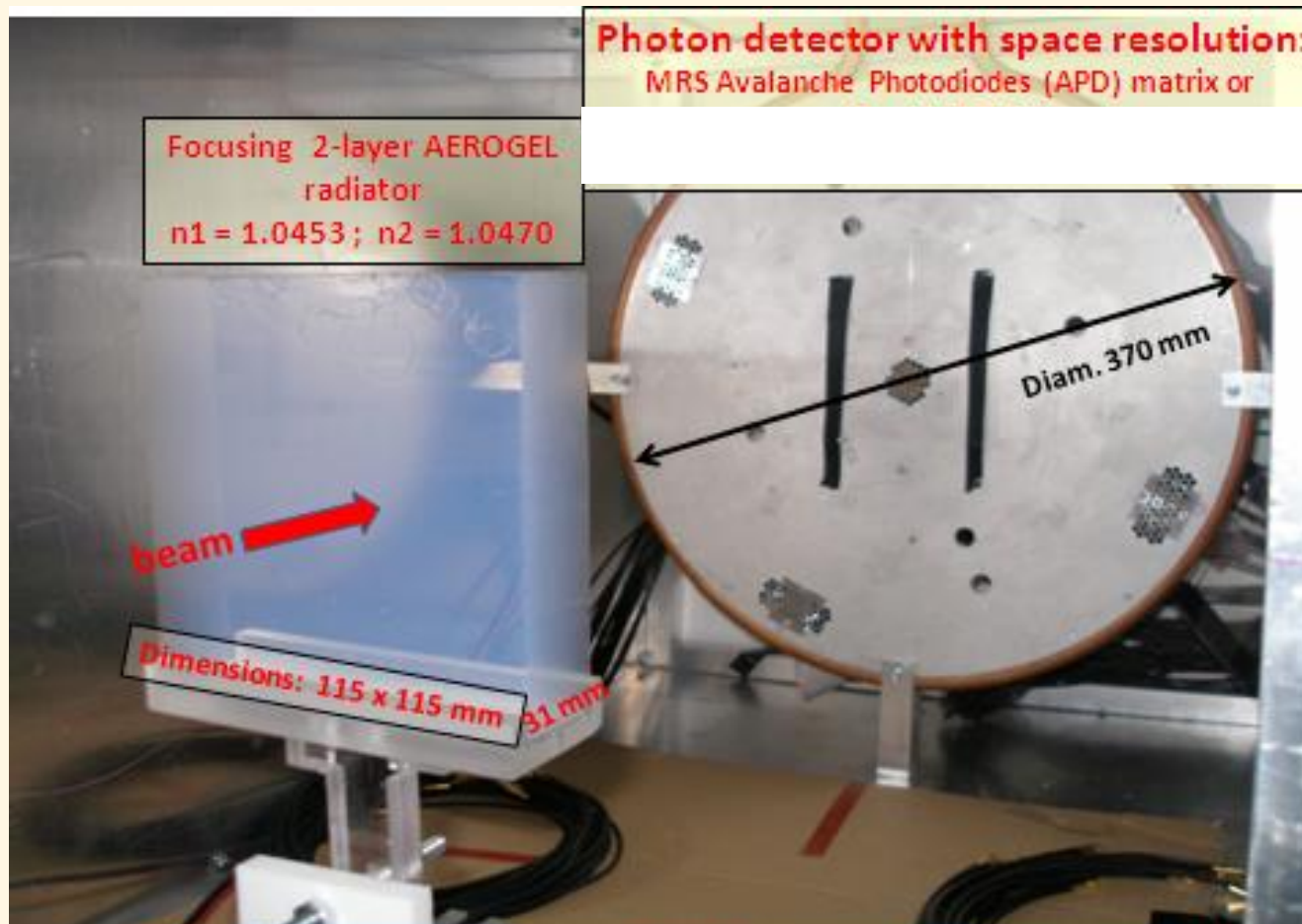
N_{pe} is the number of detected photoelectrons;

σ_{θ} is Cherenkov angle resolution in mrad;

π/K sep is the pion/kaon separation power in number of standard deviations for momentum 10 GeV/c.

Таблица показывает, что при использовании трёхслойного фокусирующего Aerogel-радиатора с коэффициентами преломления 1.05 можно достичь высокого разрешения по углу Черенкова 0.49 mrad с разделением пионов и каонов при 10 GeV/c.

Испытания на пучке релятивистских частиц FARICH Прототипа-1 (PS ALICE T10 канал)



NAME OF THE EXPERIMENT:

FARICH-Prototype (ALICE)

TEST CHANNEL:

T10 PS / Bld.157/EP-T10

SPOKESPERSON:

Andrei RESHETIN

TECHNICAL COORDINATOR:

Arturo TAURO

Start and completion dates (in according to PS Schedule-2011, P2):

14 – 29 June, 2011

General description of the experimental apparatus/test beam:

FARICH-Prototype is the Focussing Aerogel RICH Prototype detector developed for possible upgrade of the ALICE HMPID system. FARICH-Prototype consists of the aerogel SiO₂ radiator of Cherenkov photons, the photosensitive matrix plane on basis of 110 Avalanche Photodiodes (MRS APD), the water-cooling system, the light isolating box, the system of front-end and digital electronics (TRB-module) and beam trigger scintillation detectors. The lay-out of the FARICH-Prototype on the test beam (T10 PS channel) is shown in Fig.1.

Рис. 1 Схема испытаний FARICH Прототипа-1 на PS ALICE T10 тестовом канале в ЦЕРН при 6 GeV/c.



ALICE FARICH prototype beam test

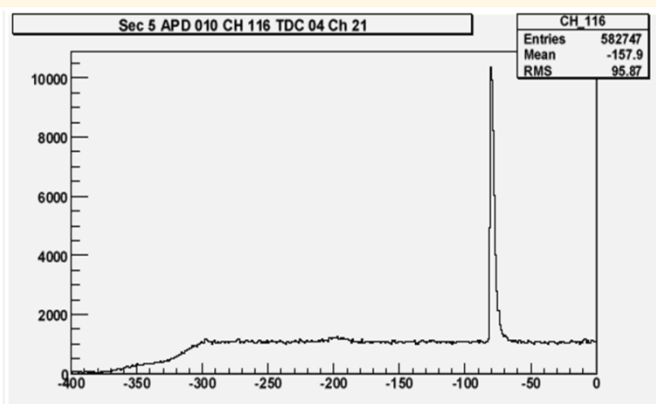


Рис.1. Пример MRS APD временного спектра для фото-чувствительного центрального сектора (сцинтилляционные фотоны)

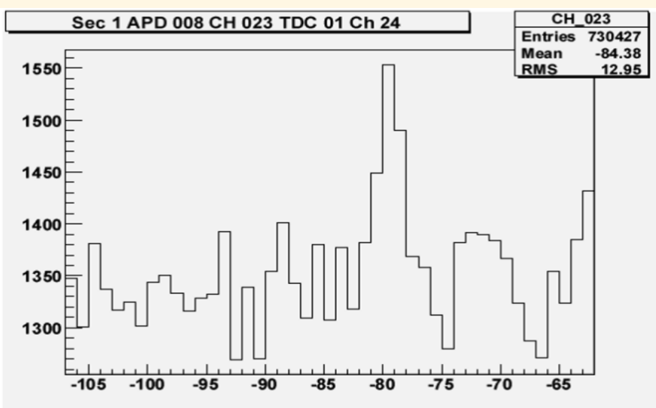
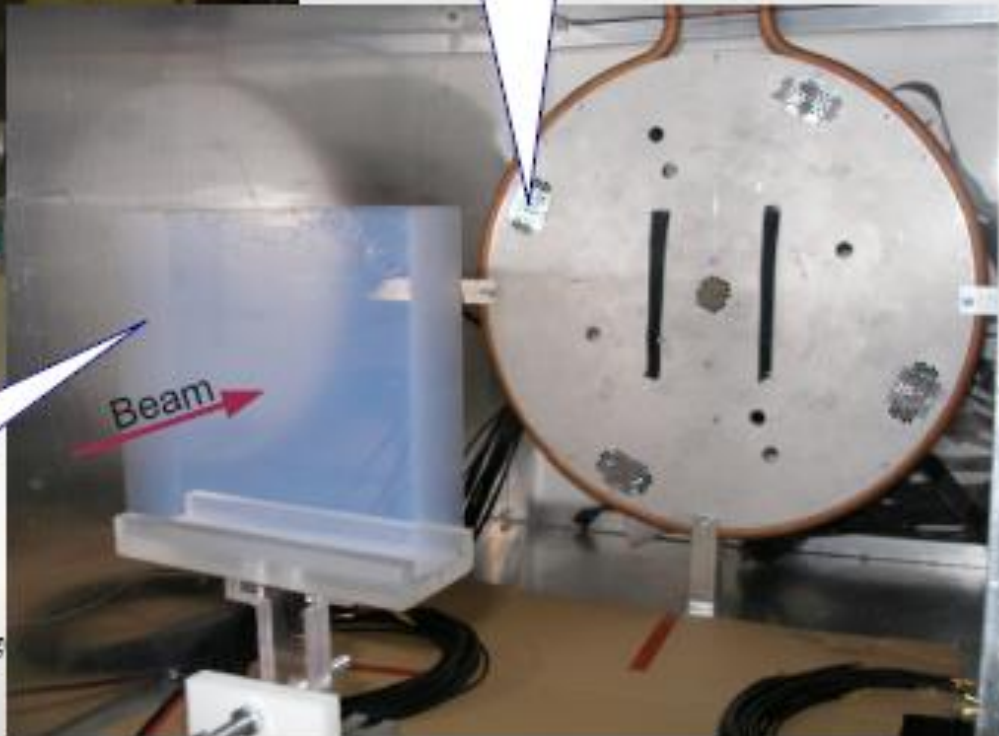


Рис.2. Пример MRS APD временного спектра для фото-чувствительного радиального сектора (фотоны Черенкова из двухслойного Аэрогеля)



MRS APD array



2-layer focusing aerogel
115x115x31mm

Слайд из презентации С.А. Кононова



Beam test of FARICH prototype with PDPC dSiPM readout

Carsten Degenhardt, Ralf Dorscheid, Thomas Frach,
York Hämisch, Oliver Mühlens, Anja Schmitz, Ben Zwaans
Philips Digital Photon Counting (Aachen, Germany)

Alexei Kurepin, Andrey Reshetin, Evgueni Usenko,
Dmitriy Finogeev
Institute for Nuclear Research RAS (Troitsk, Russia)

Alexander Barnyakov, Mikhail Barnyakov, Viktor Bobrovnikov,
Alexei Buzykaev, Sergey Kononov, Evgueni Kravchenko,
Alexei Onuchin, Alexei Talyshev
Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (Novosibirsk, Russia)
A.F. Danilyuk
Boreskov Institute of Catalysis SB RAS (Novosibirsk, Russia)

**В 2012 г. в Коллаборации с Philips Digital Photon Counting (Aachen, Germany)
был разработан, изготовлен и испытан FARICH Прототип-2.**

**Кольцевые изображения излучения Черенкова от 4-слойного фокусирующего
Aerogel-радиатора были зарегистрированы на тестовом канале PS ALICE T10**

Photon detector

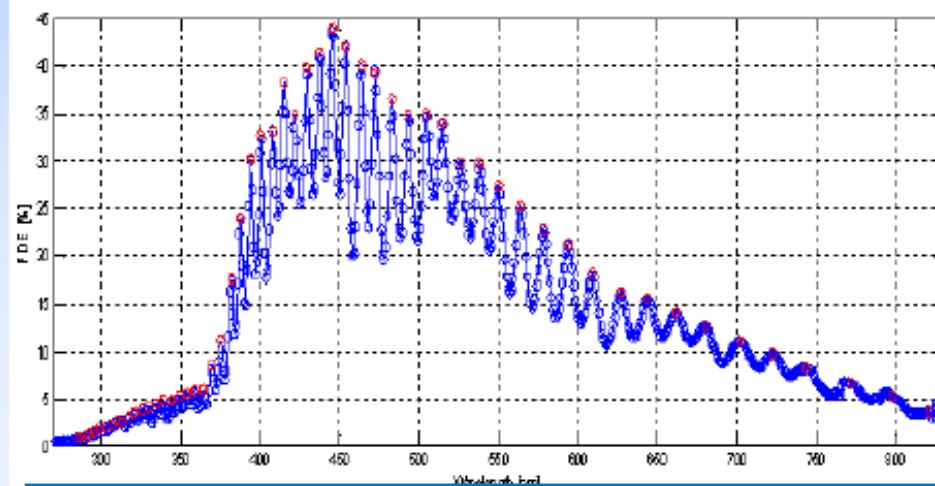
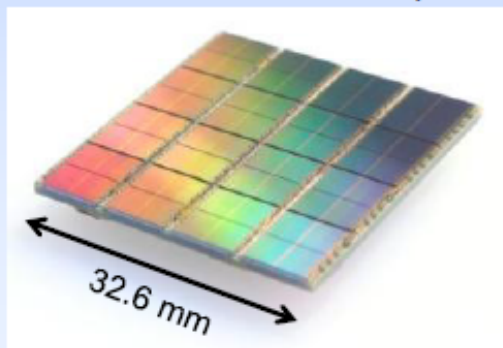
Requirements:

- Operation in magnetic field
- High photon detection efficiency
- Space resolution ~ 1 mm
- Number of channels $\sim 10^5 - 10^6$

Philips digital SiPM:

- Integrated FEE (discriminators, TDC)
- Active quenching \Rightarrow less DCR
- High time resolution

1 tile = 4x4 dies = 16x16 pixels



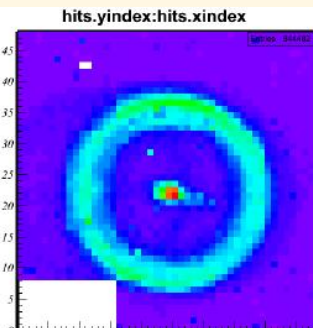
Зависимость PDE [%] от длины волны фотонов Черенкова

Свето-чувствительная матрица фирмы Philips на основе цифровых SiPM и интегрированной Front-End электроники



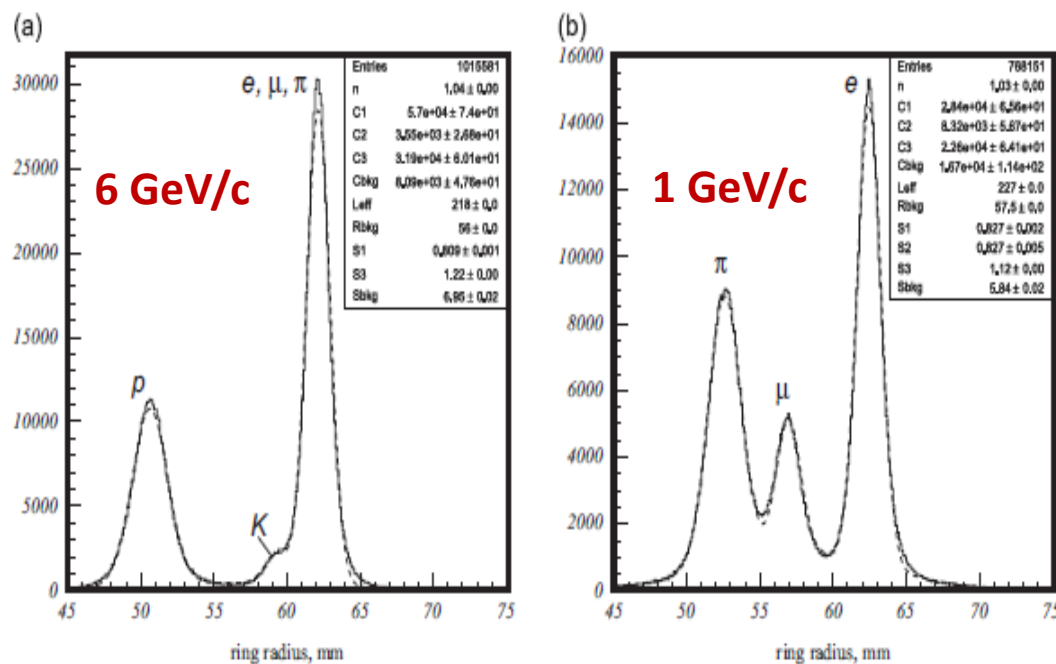
Совместные с фирмой Philips испытания FARICH Прототипа-2 на пучке релятивистских частиц (PS ALICE T10 канал)





Кольцевое изображение излучения Черенкова от 4-слойного фокусирующего Aerogel-радиатора

6. Conclusion *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 732 (2013) 352–356*



A beam test of the FARICH detector prototype with DPCs has been successfully carried out. An excellent timing resolution of $\sigma_t = 48$ ps for single photons has been obtained. We observed Cherenkov rings with 12 photoelectrons in average and a Cherenkov angle resolution of $\sigma_{\theta_c} = 3.61 \pm 0.04$ mrad for relativistic particles. π/K separation at 6 GeV/c is 3.5σ and μ/π separation at 1 GeV/c is 5.3σ . A satisfactory agreement with the Geant4 simulation results is achieved.

We studied aerogel samples produced in Novosibirsk. One is a four-layer 'focusing' aerogel 34 mm thick with refractive index of 1.046 in the densest layer and focal length of about 20 cm.

Fig. 4. Ring radius distributions for $L=200$ mm at 6 GeV/c (a) and 1 GeV/c (b) with indicated particle composition of the peaks. Fit function is shown with a dashed line.

Мы наблюдали качественное разделение пионов/каонов/протонов при 6 GeV/c и мюонов/пионов при 1 GeV/c.

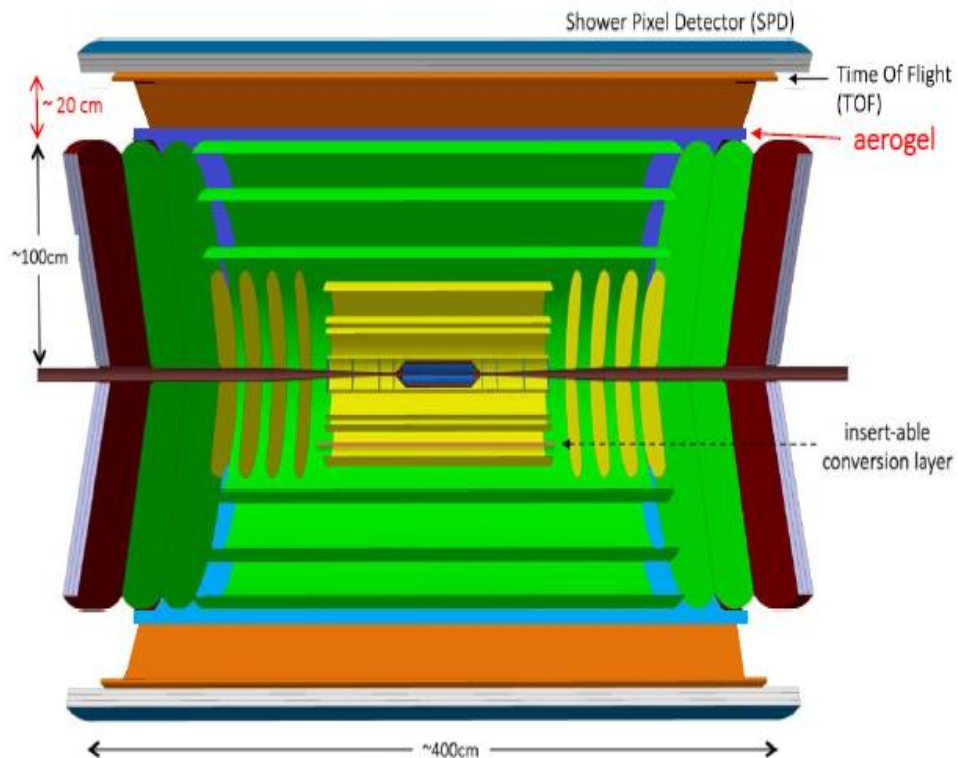
На “ALICE 3: First workshop on physics and detector” в октябре 2020 г. был представлен новый Aerogel-RICH Проект для ALICE 3 Upgrade (докладчик Antonello Di Mauro в сотрудничестве с ИЯИ РАН)

- The ALICE 3 detector introduced in the EoI fully covers the requirements of flagship cases for which PID is focused on low p_t ($\lesssim 3$ GeV/c).
- However, in the ongoing discussion to define the physics programme, various measurements could require PID at larger p_t . In addition one cannot exclude the possibility of unexpected new physics channels which would benefit of a larger PID coverage.

Было отмечено, что

RICH с proximity-фокусировкой на основе многослойного Aerogel-радиатора излучения Черенкова представляет собой простейшее и потенциально наиболее экономичное решение для дополнения измерения TOF и расширения диапазона поперечного импульса до 15-20 ГэВ / с в системе идентификации частиц HMPID. При этом ARICH-Проект полностью согласуется с исходной идеей нового эксперимента на основе кремниевых сенсоров.

Aerogel-RICH first idea for ALICE 3

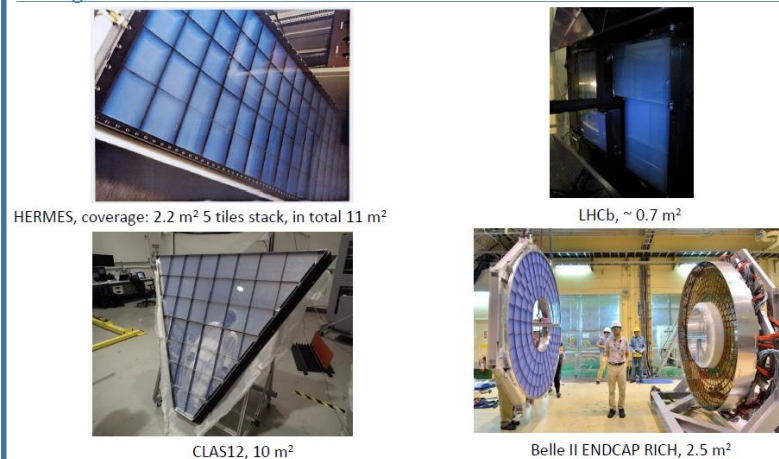


...in the ideal case of MIPs and Cherenkov photons detection by the same layer, one would implement the RICH by increasing the radius of the TOF layer by ~ 20 cm to insert the aerogel radiator and a Cherenkov expansion gap



Where is Aerogel as Cherenkov radiator used

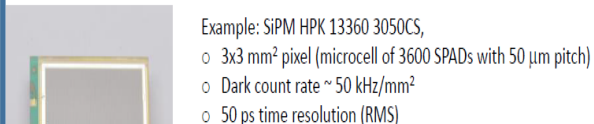
Aerogel as Cherenkov radiator



The photon detector

Main requirements

- Single photon sensitivity in the visible range (PDE > 40-50%)
- Fill factor > 80-90%
- Pixel ~ 3x3 mm² (up to 5x5 mm²)
- Ultra-fast, time resolution $\sigma < 100$ ps
- Area coverage ~ 30 m²



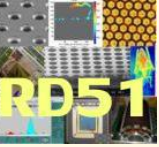
The photon detector, for example:
SiPM HPK 13360 3050CS, 3 x 3 mm

Slides from the presentation:

A. Di Mauro, E. Nappi, R. Preghenella, G. Volpe

ALICE 3: First workshop on physics and detector

14/10/2020



В ЦЕРН-Проекте “RD51 EXTENSION BEYOND 2018”

отмечено:

«Очень оснадеживающие и перспективные тенденции наблюдаются на пути объединения газовых MPGD-детекторов и черенковских излучателей».

Вопрос: можно ли рассматривать прототип GEM с фотокатодом на основе CsI как один из вариантов детектора Aerogel-RICH в ALICE 3 ?

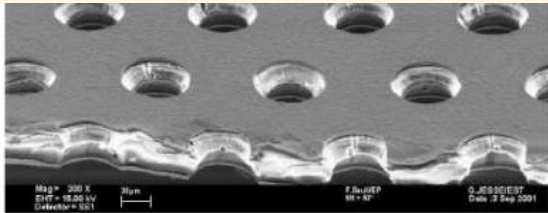
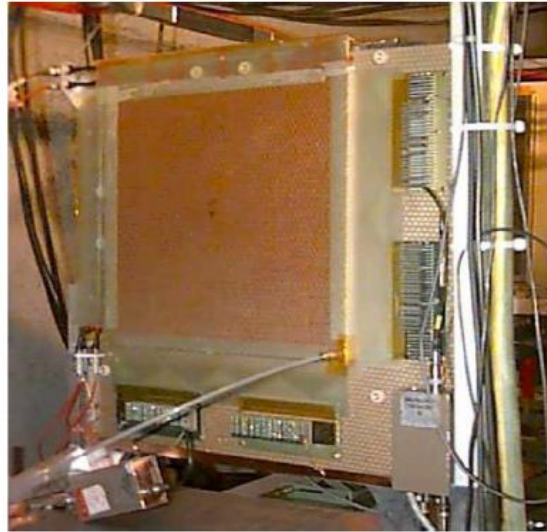


Fig. 1. Electron microscope view of a GEM. Hole diameter and pitch are 70 and 140 μm .

2. Detection of photons

GEM detectors can be made sensitive to photons using an internal photosensitive layer,



Triple-GEM detector for COMPASS (Alexeev, M. et al.)



Prototype of a GEM detector for TOTEM

Экспериментально было показано, что GEM-детекторы с внутренним фото-чувствительным слоем (CsI-фотокатоды) могут иметь высокую чувствительность к фотонам излучения Черенкова.

“Novel Cherenkov photon detectors” were discussed in the article by Fabio Sauli, NIM A553 (2005) 18-24.

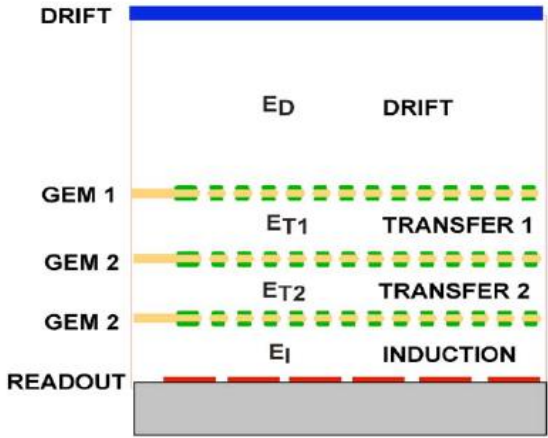


Fig. 2. Schematics of a triple-GEM detector.

Offering position accuracies of 50 μm and multi-particle resolutions of around 1mm, they are already in use in several particle physics experiments or under development for other applications. Fig. 3 shows one of the triple-GEM detectors built for the COMPASS experiment at CERN; 20 chambers, with an active area of $\sim 1000 \text{ cm}^2$ each and two-dimensional projective readout, are successfully operated in the experiment [4]. Fig. 4 is a close view of a prototype for the TOTEM forward tracker for CMS, of similar conception but with a shape tailored to detect particles very close to the primary beam [5]. A

CHERENKOV RING IMAGING

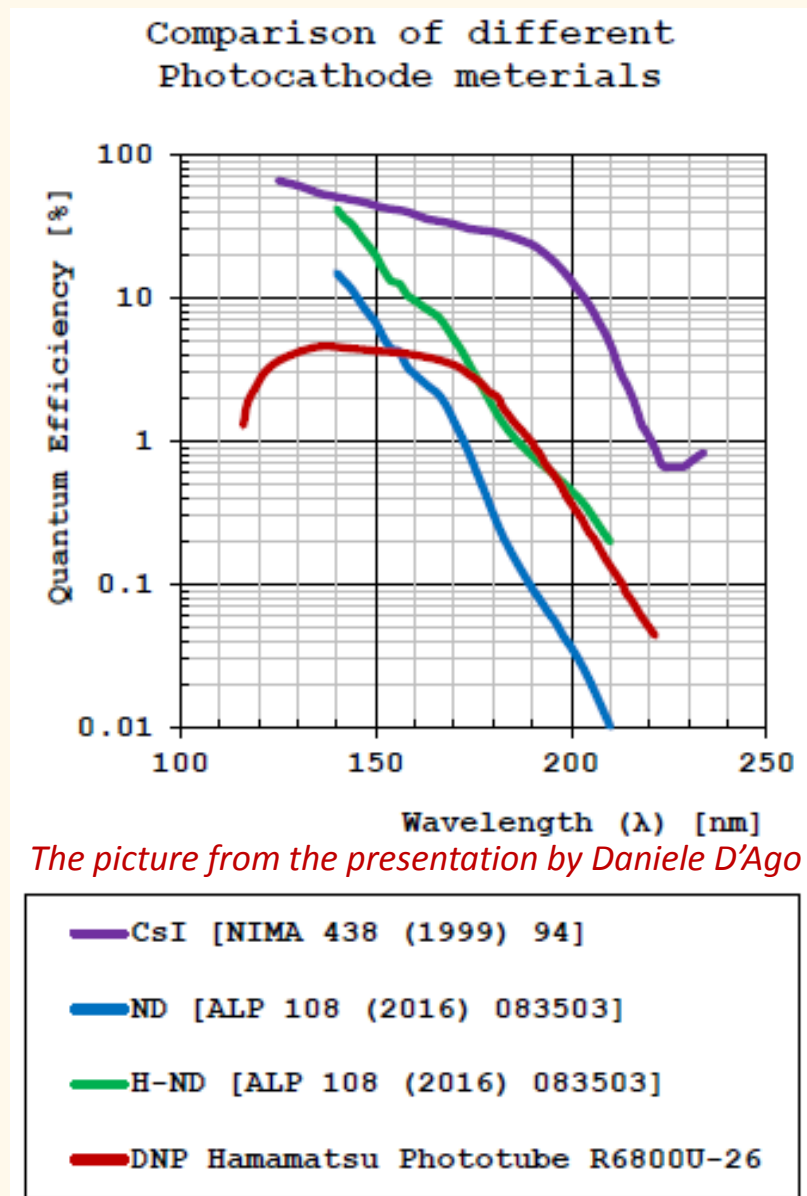
COMPASS RICH-1 MPGD UPGRADE
DOUBLE STAGGERED THGEMS+MICROMEGAS

M. Alexeev et al, MPGD Workshop (Trieste 2015)

Fabio Sauli 20 YEARS OF GEM DETECTORS CERN 21 October 2016 45

Alexeev, M. et al. The MPGD-based photon detectors for the upgrade of COMPASS RICH-1. Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. 876, 96-100 (2017).

Cs I and Nanodiamond quantum efficiency



The picture from the presentation by Daniele D'Ago

Cs I – quantum efficiency is 50 % at wavelength 140 nm.

The Cherenkov light is Rayleigh scattered in Aerogel:

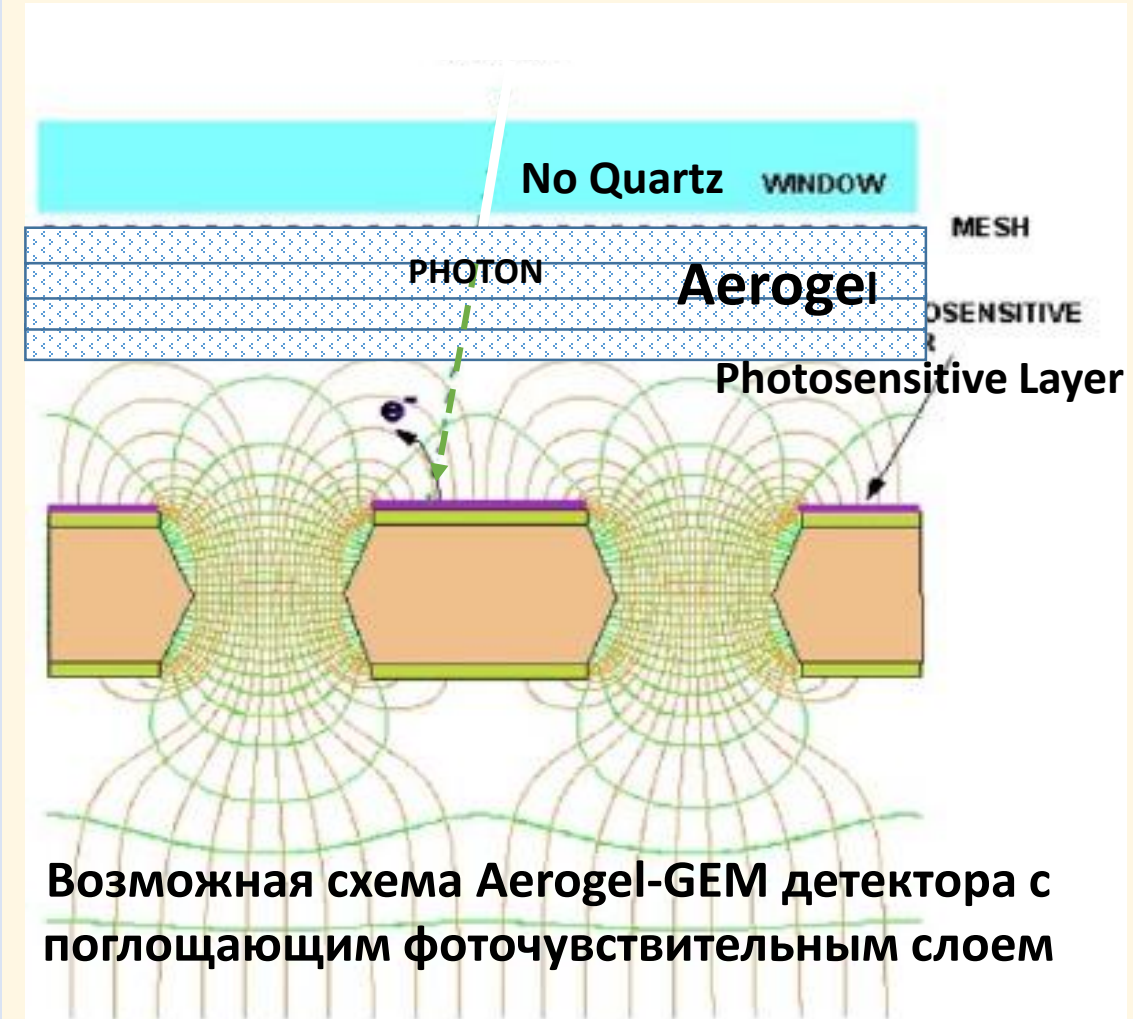
the intensity of scattered light is $I_{\text{scat}} \sim 1 / \lambda^4$,
 the scattering length is $L_{\text{scat}} = 35 - 50$ mm for $\lambda = 400$ nm.

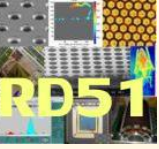
The light transparency of 20 mm-Aerogel block is
 ~ 60 % at $\lambda = 400$ nm
 and only 0.5 % at $\lambda = 220$ nm

Вывод:

CsI or Nanodiamond не могут быть использованы в качестве фотокатодов в RICH-детекторах с Aerogel-радиаторами.

В этом случае кремниевые ФЭУ SiPM остаются основной опцией для разработки фотонного детектора в Aerogel-RICH Проекте ALICE-3. !!!

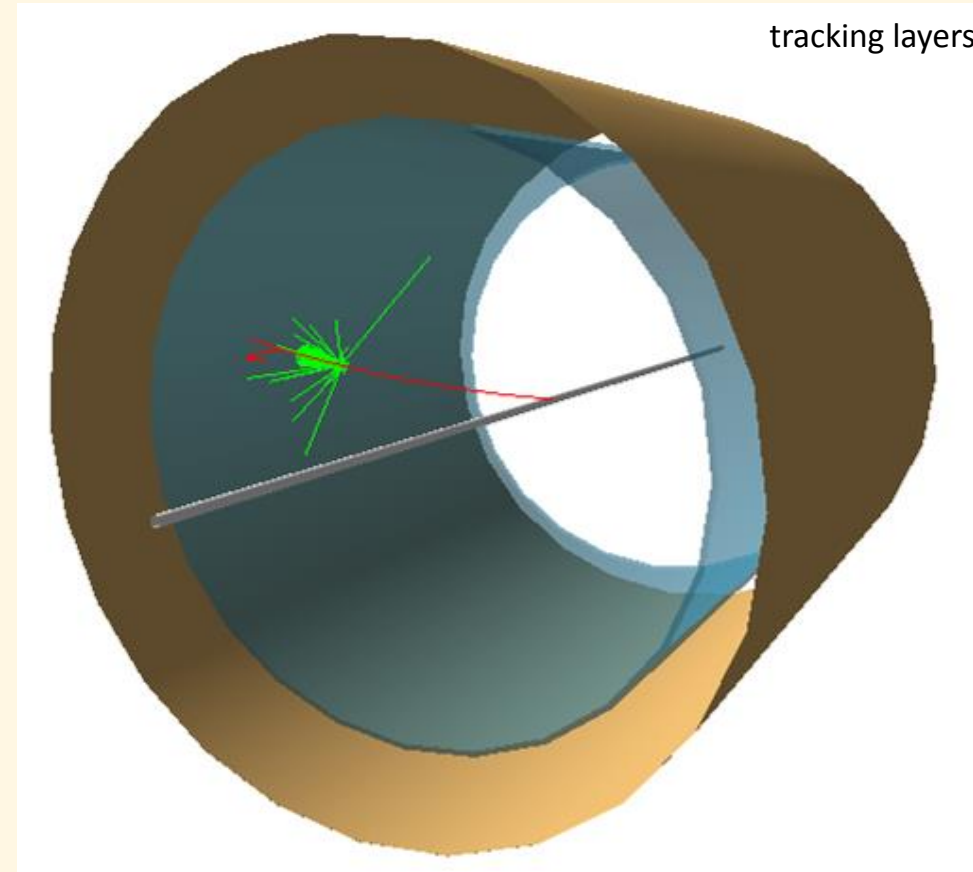




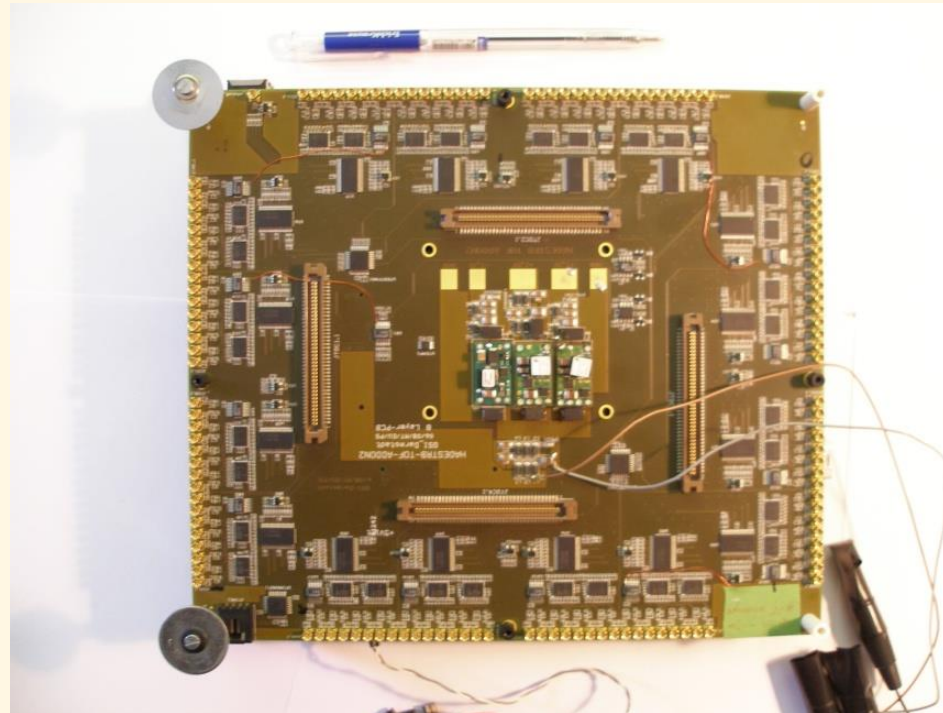
Спасибо за внимание!

Spare Slides

- **aerogel radiator**
 - cylinder, inner R = 100 cm
 - 2 cm thick
 - refractive index $n = 1.03$
 - material properties to be tuned
 - optical properties from measurements
- **expansion region**
 - 20 cm thick
 - Argon gas
 - $n = 1.00$ (it is anyway small < 1.0003)
- **Photo-detector surface**
 - cylinder at R = 122 cm
 - silicon sensors, SiPM HPK 3050CS
 - $3 \times 3 \text{ mm}^2$ active area, $3.14 \times 3.14 \text{ mm}^2$ pitch, 3.1 M channels (91% fill factor)



System of front-end and digital electronics was developed



128-channel Time Readout Board (TRB)

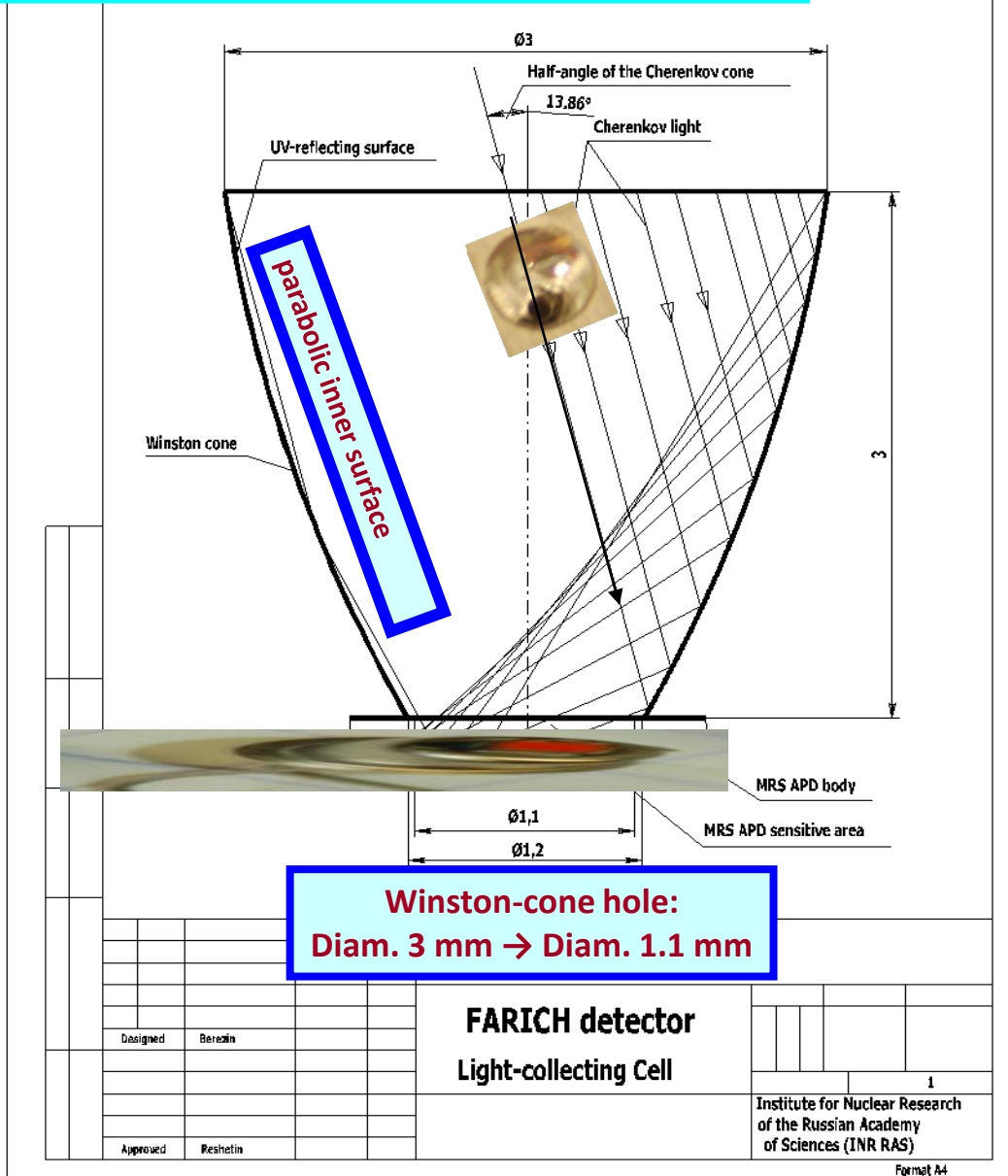
Winston-cone holes for light-collection

For testing the prototype Winston-cone holes with parabolic inner surface in aluminium and stainless steel plates have been produced.

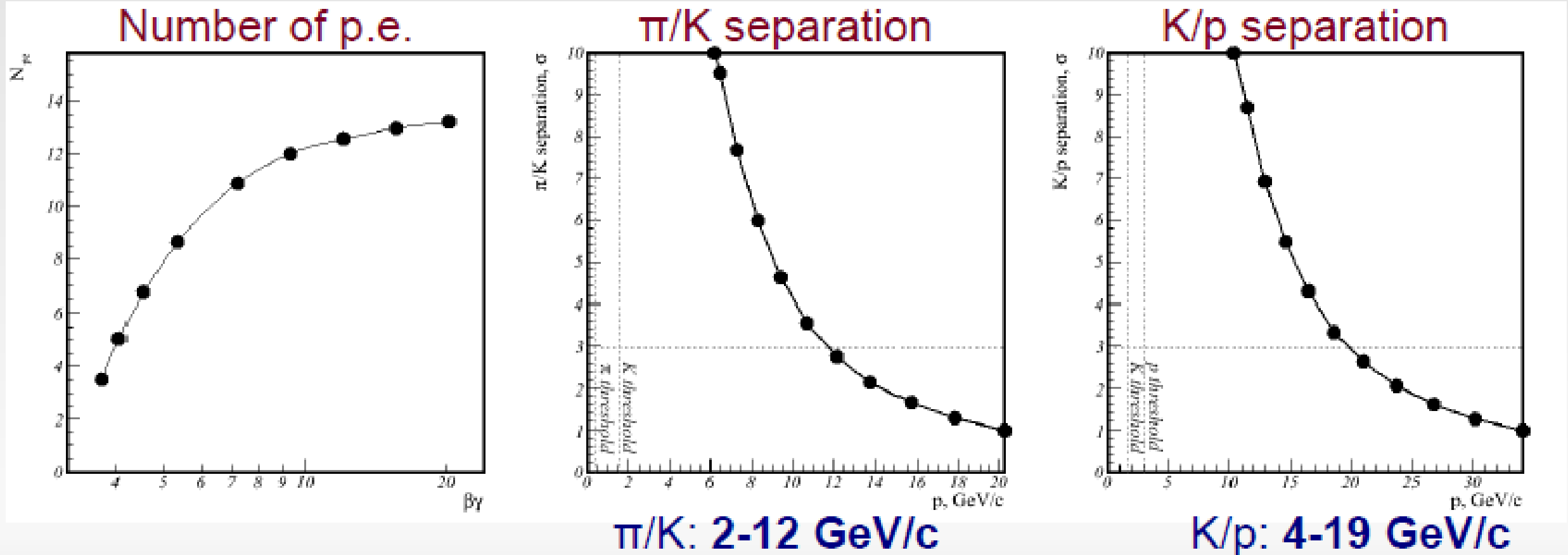
Winston-holes in aluminium plate had 4 types of the treatment of an inner surface:

- treatment with special (14 class) polishing
- treatment with polishing of a tool edge;
- pressure method;
- pressure method with polishing.

Winston-holes in stainless plate were polished by 4 different methods of electric-plasma polishing.



- MRS APDs (yellow) with 2.6 mm size (Winston cones)
- 50% light collection efficiency
- 2-layer focusing aerogel ($n_1=1.048$, $n_2=1.050$), total thickness 30mm
- Distance between radiator and photon detectors – 500 mm.



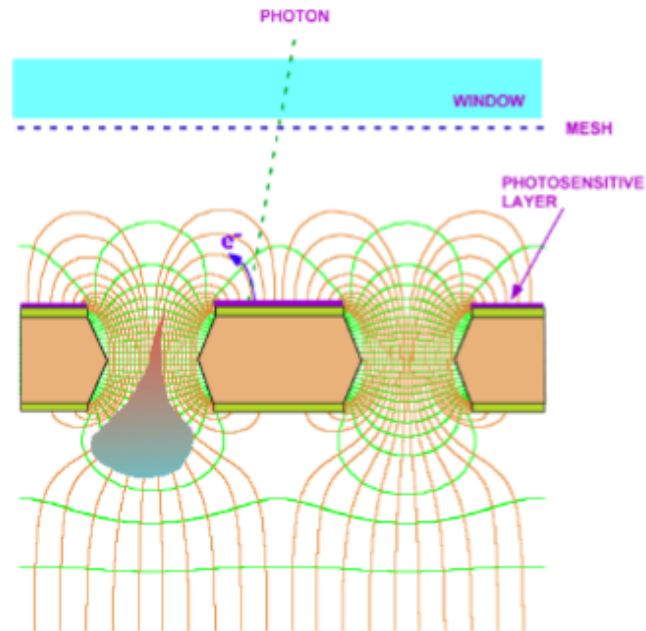


UV PHOTON DETECTION: CsI PHOTOCATHODES

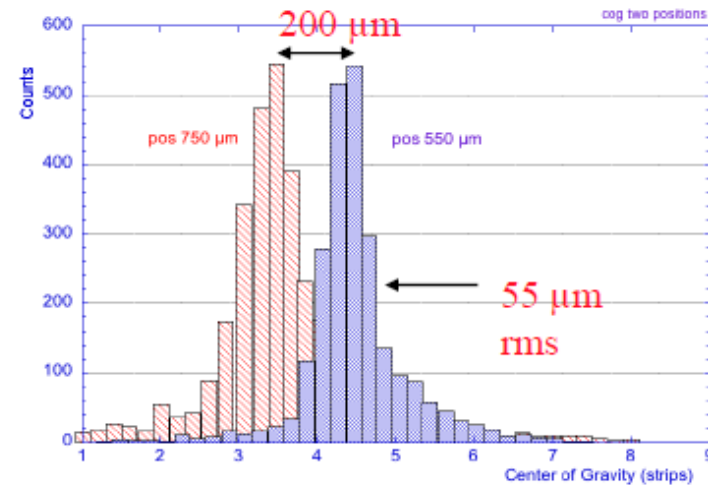


REFLECTIVE CsI PHOTOCATHODE ON UPPER GEM ELECTRODE

- NO PHOTON FEEDBACK
- INSENSITIVE TO DIRECT IONIZATION



TRIPLE GEM
COLLIMATED SINGLE UV PHOTON SOURCE
POSITION ACCURACY

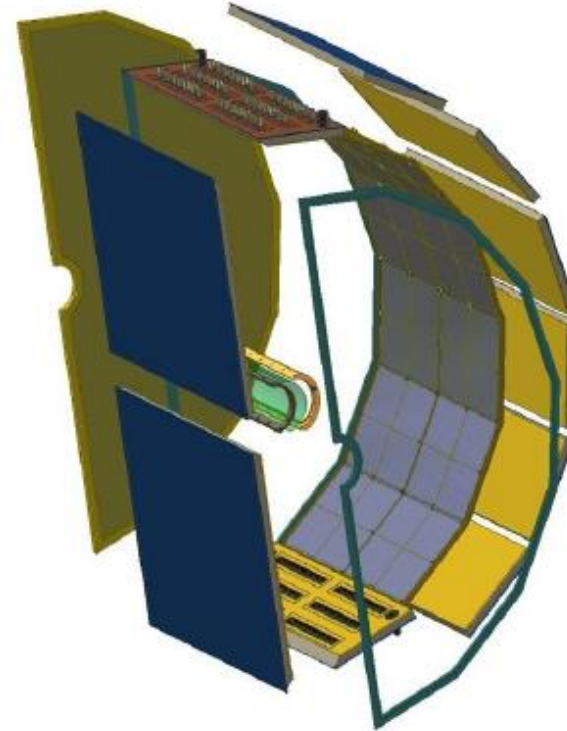
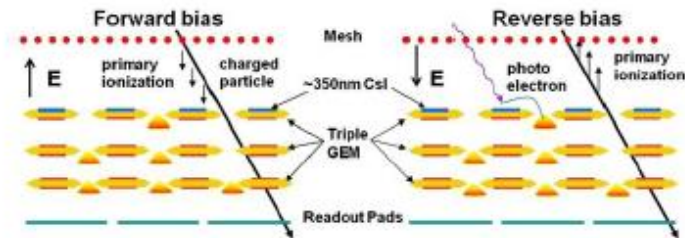
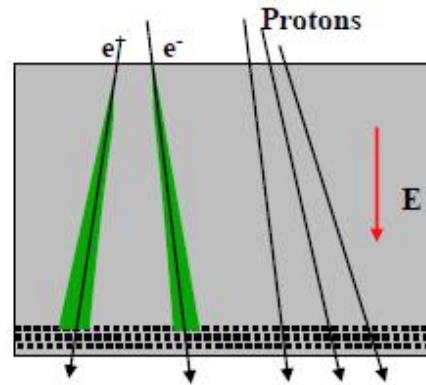


T. Meinschad, L. Ropelewski and F. Sauli, NIMA 535(2004)324



PHENIX HADRON BLIND DETECTOR

“INVERSE FIELD” TPC



C. Aidala et al, Nucl. Instr. and Methods A502(2003)200

Z. Fraenkel et al, Nucl. Instr. and Methods A546(2005) 466