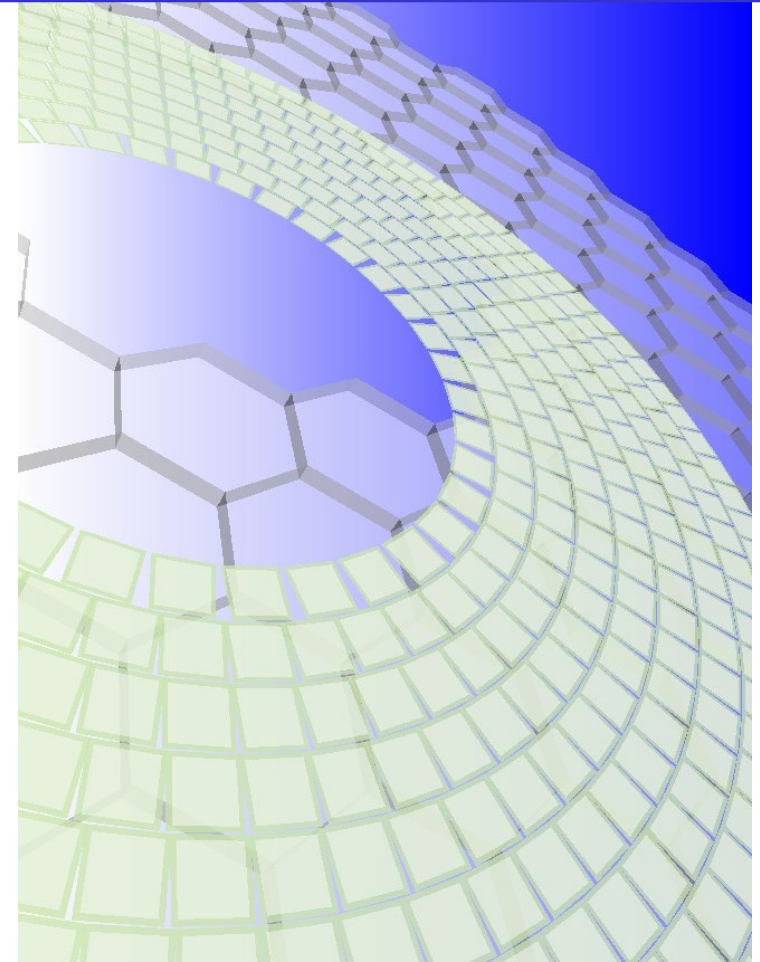
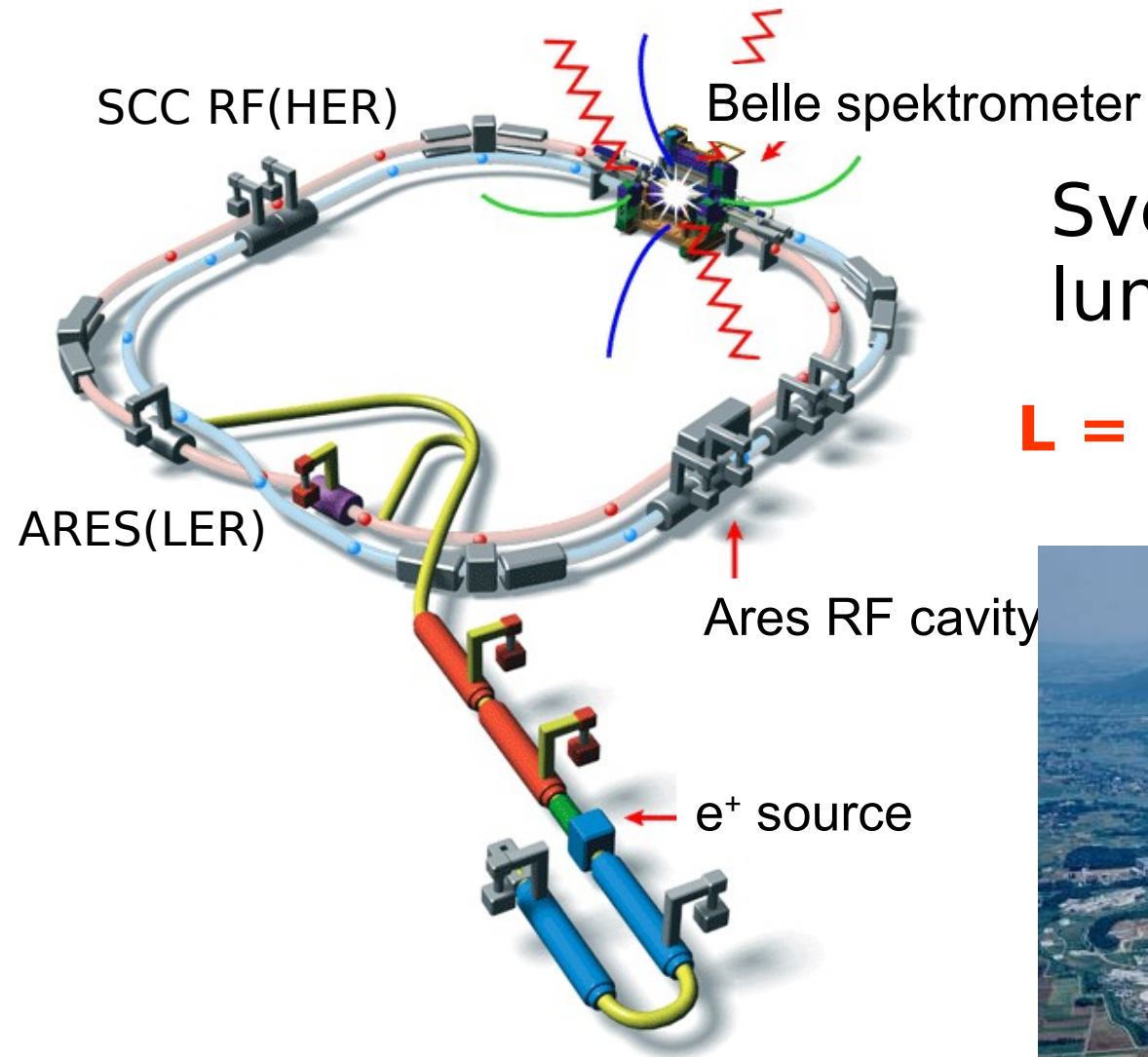


## Detektor obročev Čerenkova za spektrometer Belle

- Motivacija
- Načrtovanje
- Optimizacija parametrov števca
- Rezultati meritev s curki delcev
- Izboljšave aerogela
- Razvoj fotonskega detektorja
- Zaključek



# Asimetrični trkalnik $e^+e^-$ KEKB

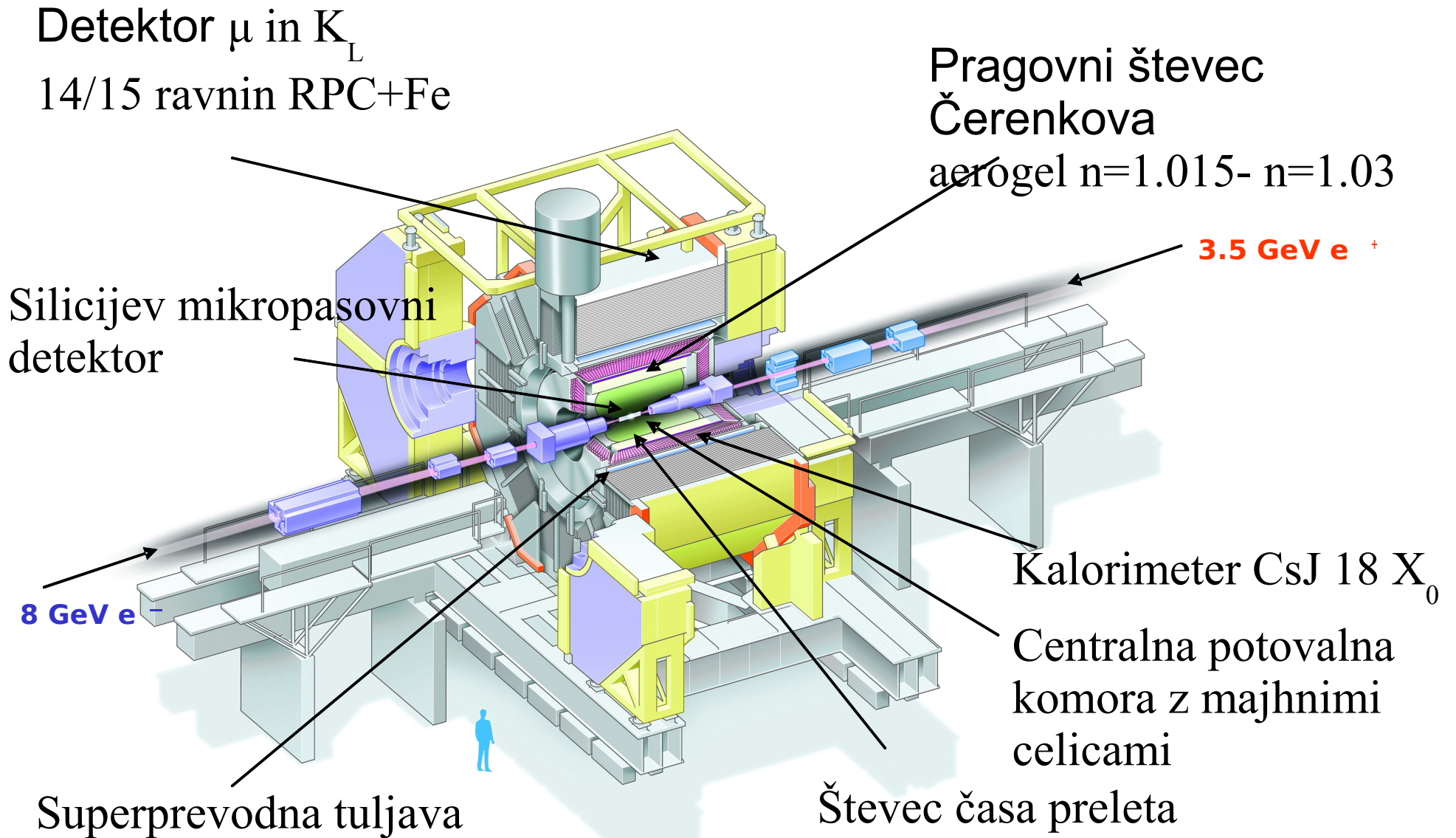


Svetovni rekord v  
luminoznosti:

$$L = 1.7 \times 10^{34} / \text{cm}^2 / \text{sec}$$



# Spektrometer Belle



# Dosežki eksperimenta Belle

- Meritev matričnih elementov matrike CKM in kotov unitarnega trikotnika
- Odkritje direktne kršitve simetrije CP v razpadih B
- Meritev redkih razpadov (npr.  $B \rightarrow \tau \nu$ ,  $D \tau \nu$ ) s popolno rekonstrukcijo drugega mezona B
- Odkritje mešanja mezonov D
- Kršitev CP v prehodih  $b \rightarrow s$ : sonda za nove izvore CP
- Asimetrija naprej nazaj ( $A_{FB}$ ) v razpadih  $b \rightarrow sl^+l^-$  - močno orodje za iskanje odstopanj SM
- Odkritja novih hadronov

Rezultati eksperimenta so potrdili napoved Kobayashija in Maskawe, ki bosta zanjo letos dobila Nobelovo nagrado



# Motivacija za nadgradnjo poskusa v Super B

Naslednji korak: bistveno povečati velikost vzorca (x 100)

- Iskali bomo nove pojave izven SM
  - **Kršitev simetrije CP v razpadih B in D- iskanje odstopanja od napovedi SM**
  - **Kršitev leptonskega okusa v razpadih  $\tau$  .**
  - **Razpadi  $B \rightarrow \tau \nu$  ,  $D \tau \nu$  - sonda za nabite Higgse**
- Ti razpadi bodo pomagali razložiti oziroma omejiti fizikalne modele.
- **Fizikalna motivacija je neodvisna od LHC.**
  - Če LHC odkrije odstopanje od SM, so potrebne precizijske meritve prehodov med delci različnih okusov
  - Če ga ne odkrije, bo zajeten vzorec razpadov B/ $\tau$  eden izmed redkih načinov za iskanje fizikalnih odgovorov pri energijah nekaj TeV.

KAKO izvesti zastavljene cilje ?

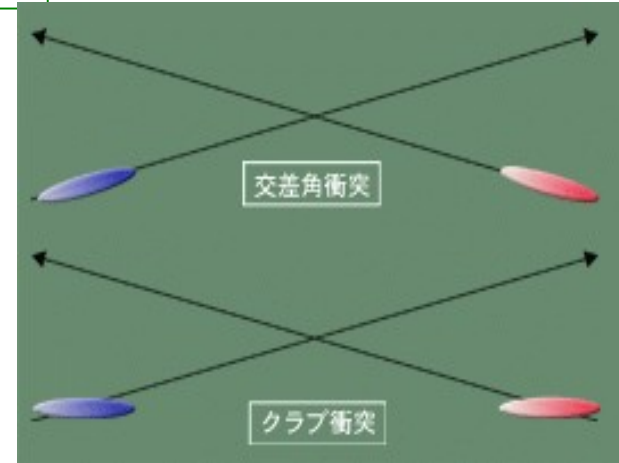
# Super B tovarna v KEKu

Interakcijska točka  
Rakovo križanje

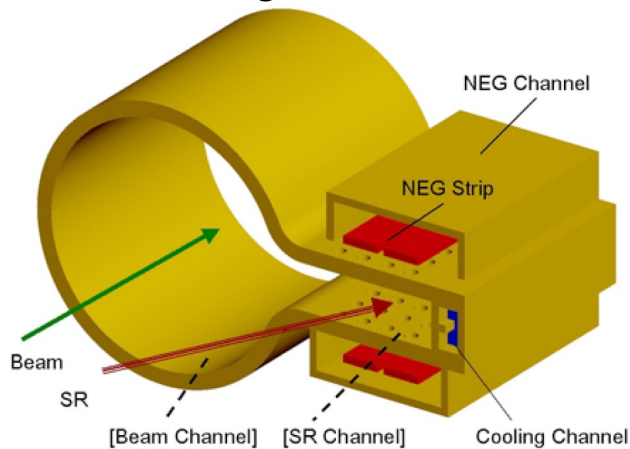
Več RF moči

Nova žarkovna cev

Obroč za dušenje



Namen: zmanjšanje  
elektronskega oblaka



Linac:  
prenovitev

**Cilj:**  
 **$L = 8 \times 10^{35} / \text{cm}^2 / \text{s}$**

$\int L dt = 50 \text{ ab}^{-1}$

8. oktober 2008

Rok Pestotnik, ARICH za Belle

# Zahteve za detektor ob Super B

Kritične točke pri  $L = 8 \times 10^{35}/\text{cm}^2/\text{sec}$

- **Višje ozadje ( $\times 20$ )**

- sevalne poškodbe in zasedenost
- lažni zadetki in kopičenje šuma

- **Večje pogostost dogodkov ( $\times 10$ )**

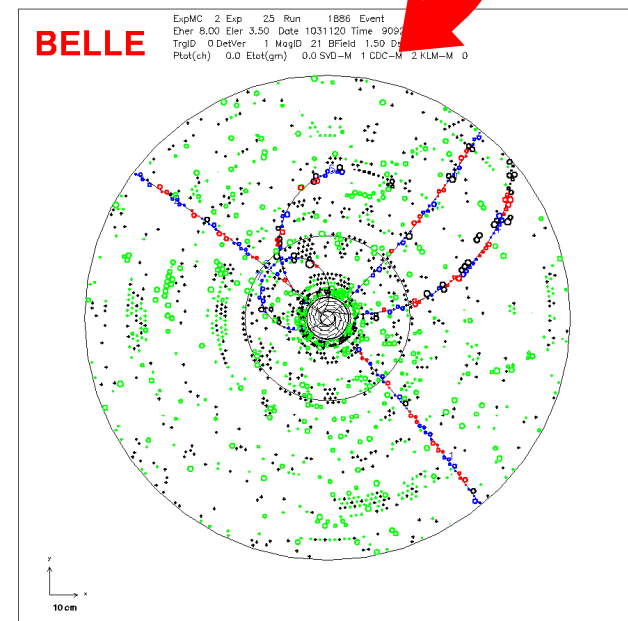
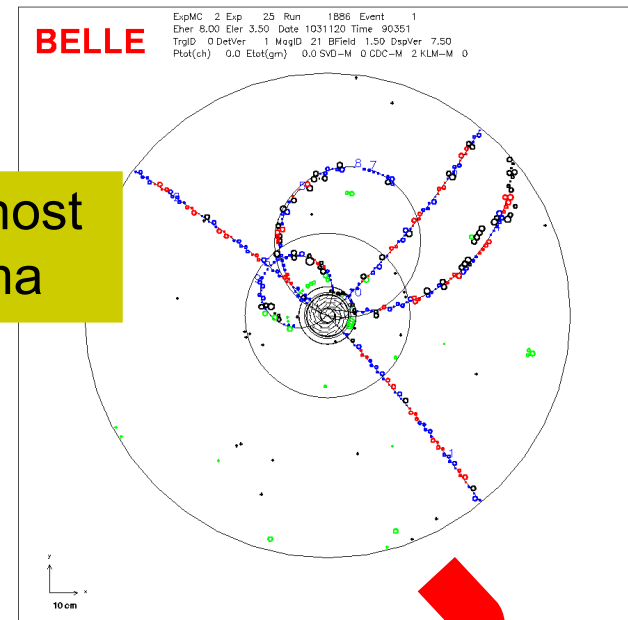
- hitrejši in učinkovitejši prožilni sistem, DAQ

- **Nove zahteve**

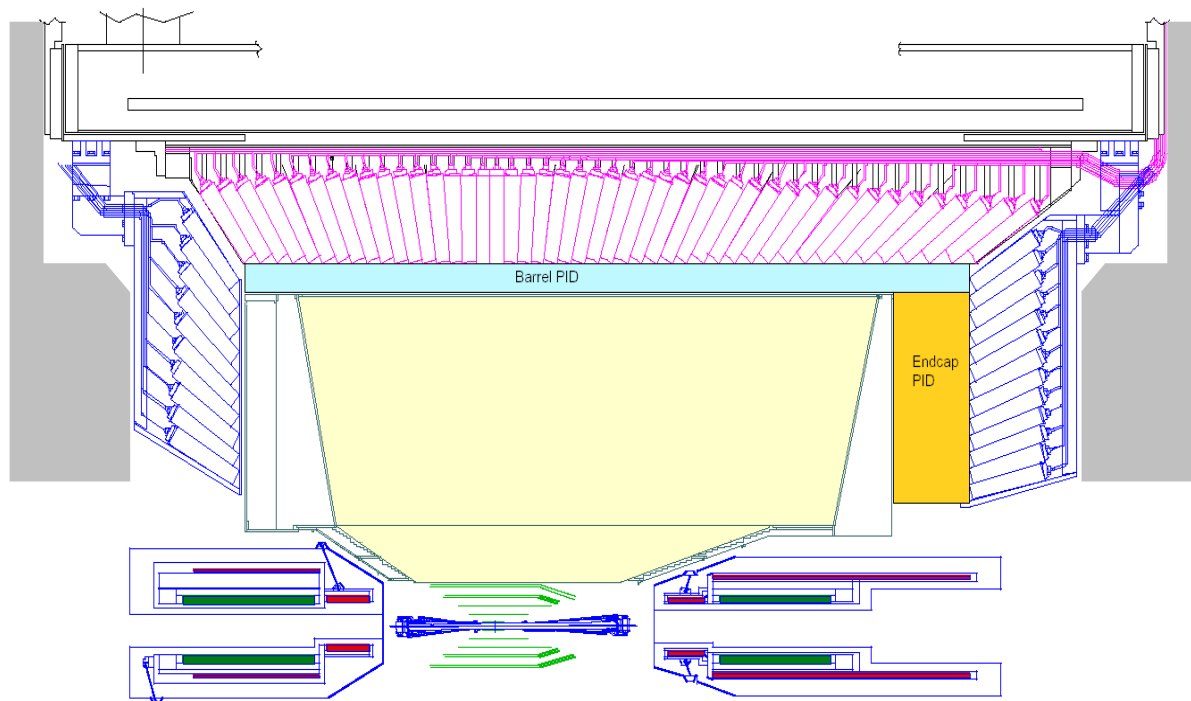
- identifikacija  $\mu$  pri nizkih  $p$ :  
 $b \rightarrow s\mu \mu$
- hermetičnost: "rekonstrukcija"  $v$

Možna rešitev:

- Zamenjava notranjih ravnin detektorja verteksov z detektorjem s krajšimi pasovi.
- Zamenjava notranjega dela drift komore z mikropasovnim silicijevim detektorjem.
- Boljša identifikacija nabitih delcev
- Zamenjava dela kalorimetra s čistim CsI.
- Hitrejša čitalna elektronika in računski sistem.



# Izboljšava identifikacije nabitih delcev



Izboljšati ločevanje  $K/\pi$  v smeri naprej (visoke gib. količine)

Ločevanje  $K/\pi$  za meritve pingvinskih procesov  $b \rightarrow d\gamma$ ,  $b \rightarrow s\gamma$

Izboljšati čistost vzorca popolnoma rekonstruiranih mezonov  $B$

Ločevanje  $e/\mu/\pi$  pri  $p < 1 \text{ GeV}/c$ :  $B \rightarrow K\ell\ell$

Ohraniti visok izkoristek za kaone, ki označujejo okus.

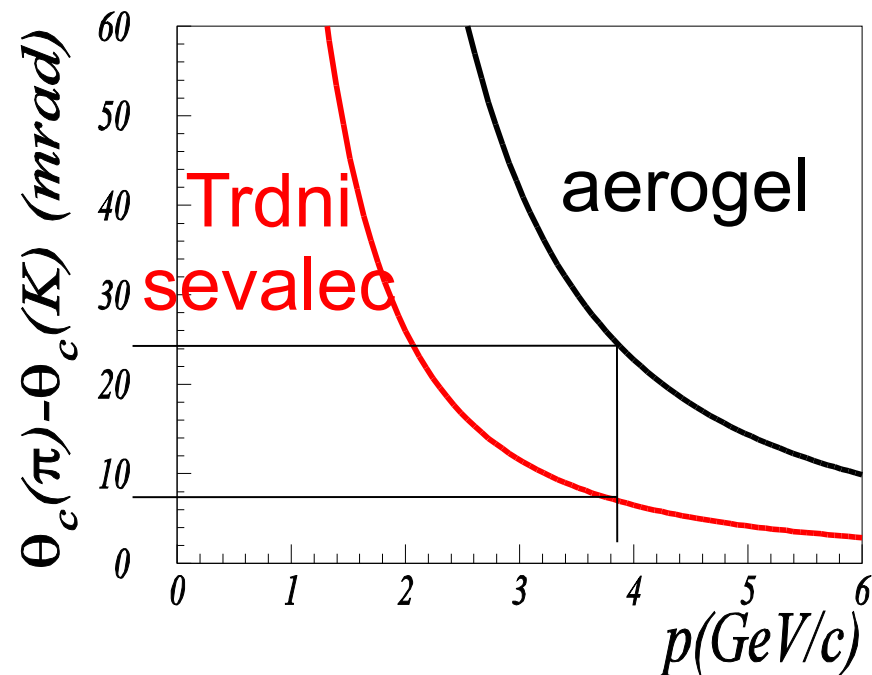
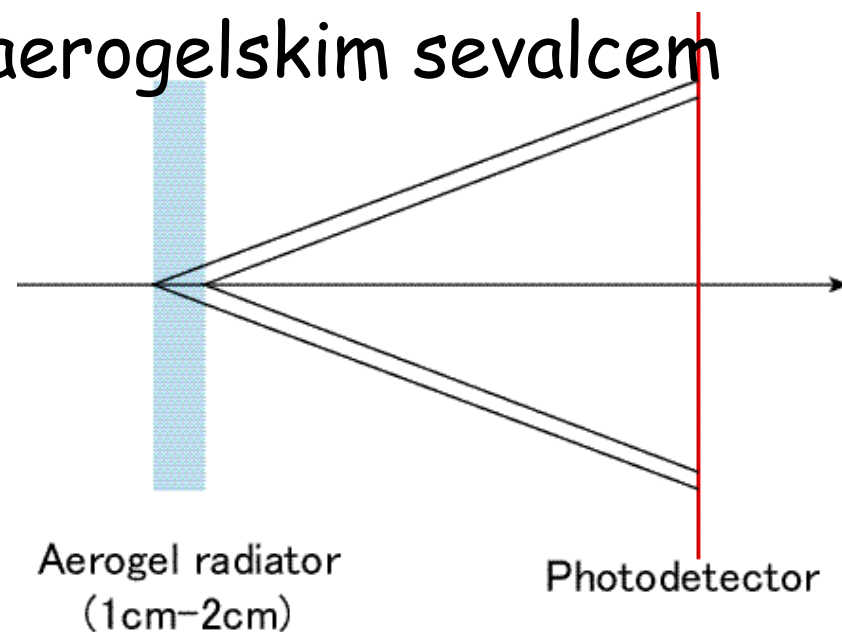


# Števec obročev Čerenkova z aerogelskim sevalcem

Identifikacija v smeri naprej:

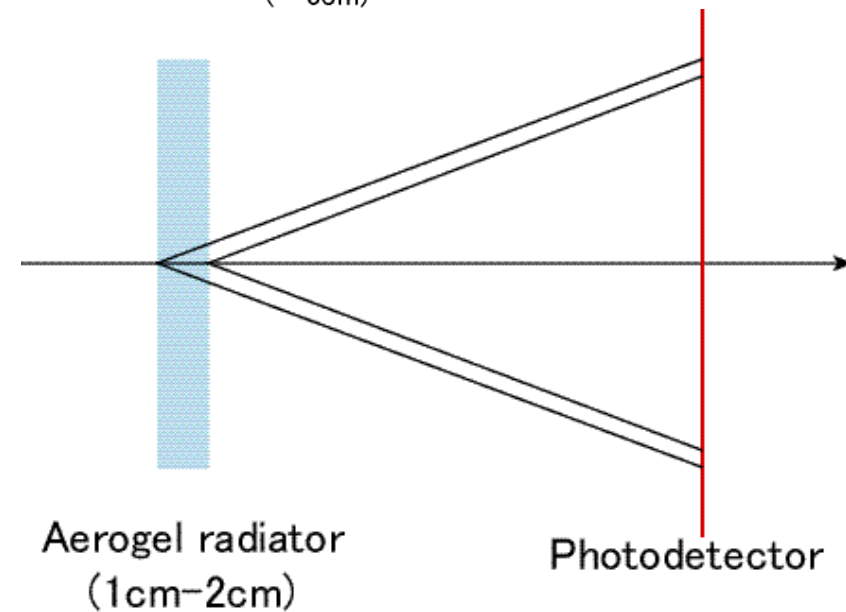
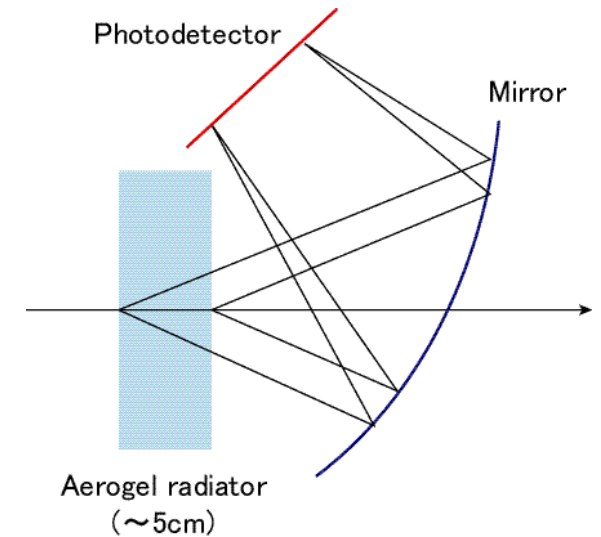
- Detektor obročev Čerenkova z aerogelom kot sevalcem

- Velikost obroča pri aerogelu  $n=1.05$   
 $\theta_c(\pi) = 310 \text{ mrad @ } 4 \text{ GeV/c}$
- Večja razlika v kotu  $\theta_c(K) - \theta_c(\pi)$  kot z uporabo trdnega sevalca
- Širše kinematično območje kot pragovni števec
  - Ločevanje  $\pi/K$  za velike gib.kol.
  - Ločevanje  $\mu/\pi$  za nizke gib.kol.
- Malo materiala
- Detekcija fotonov v vidnem območju



# Izbira tipa detektorja

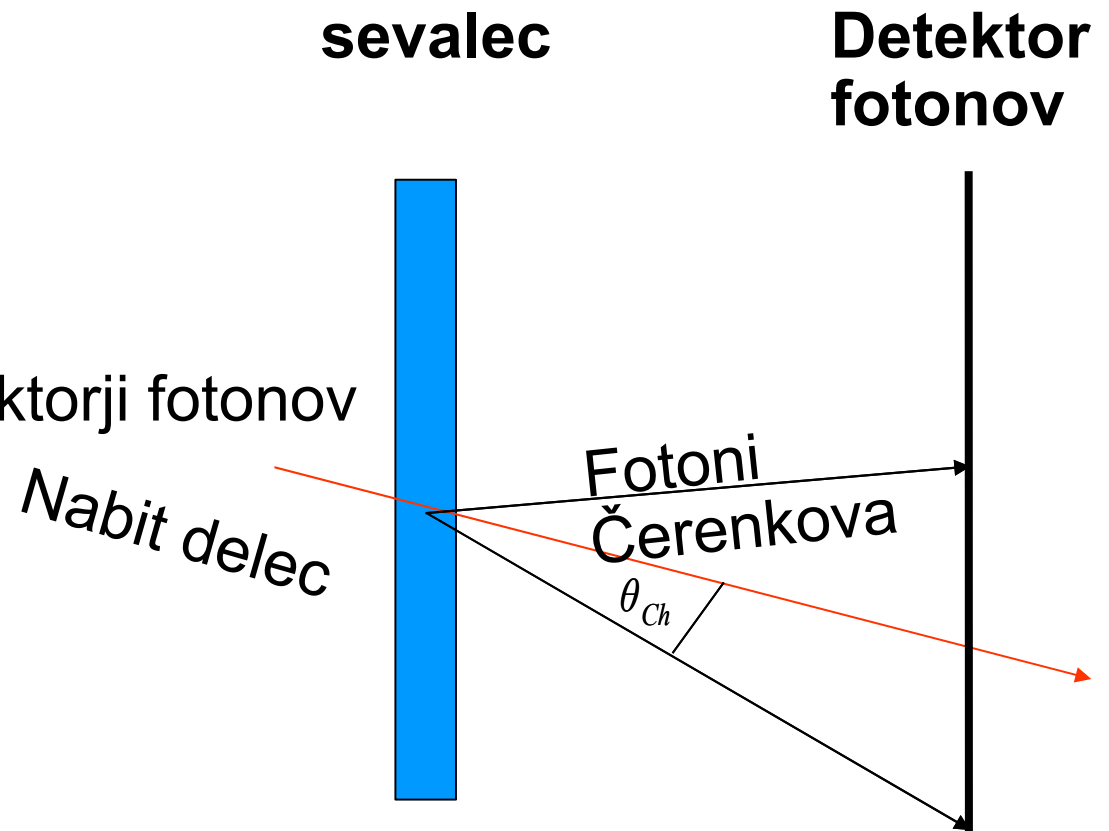
- Z uporabo zrcal
  - HERMES, LHC-B (odprta geometrija detektorja)
  - Debel aerogel
    - Lažji izplen zadostnega števila fotonov.
- **Brez fokusirnega sistema**
  - Ustrezen za esperimente na trkalnikih
  - Aerogel mora biti dovolj tanek, da ne pokvari ločljivosti detektorja.
    - Ali lahko izplenimo dovolj fotonov?



# Števec obročev Čerenkova z aerogelom kot sevalcem brez fokusirnega sistema zrcal

Elementi detektorja :

- Aerogel - sevalec
- Prostor za razširjanje
- Pozicijsko občutljivi detektorji fotonov
- Čitalna elektronika



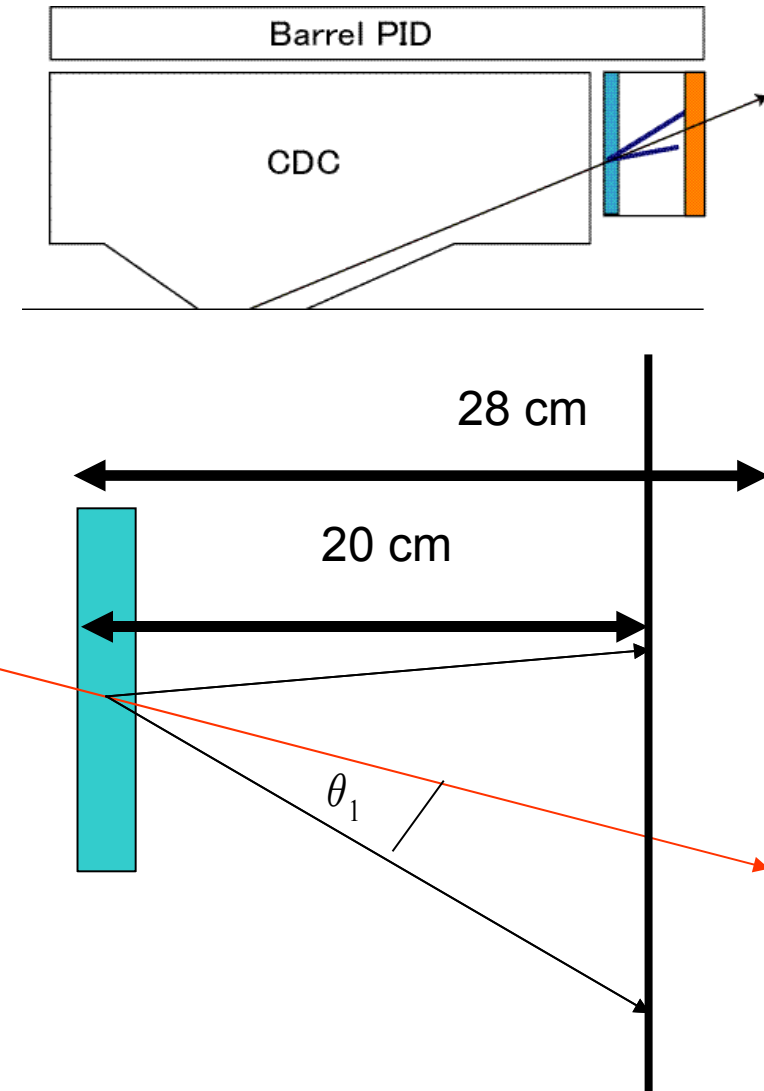
**Cilj: Možnost ločevanja delcev z gotovostjo  $5\sigma$  pri  $4 \text{ GeV}/c$ , kjer je**

za  $n=1.05$        $\vartheta_{Ch}(\pi) - \vartheta_{Ch}(K) = 23 \text{ mrad}$

# Robni pogoji

- Da dosežemo potrebne lastnosti moramo zaznati  $N_{\text{det}} \cong 10$
- Na voljo imamo samo 28 cm prostora
- Željeno ločljivost lahko dosežemo le z:
  - Prostorom za razširjanje  $\cong 20$  cm
  - Debelino sevalca  $\leq$  nekaj cm
  - Granulacijo fotonskega det  $\cong$  nekaj mm
- Dodatna komplikacija:
  - Fotonski detektor mora delovati znotraj spektrometra v magnetnem polju 1.5 T

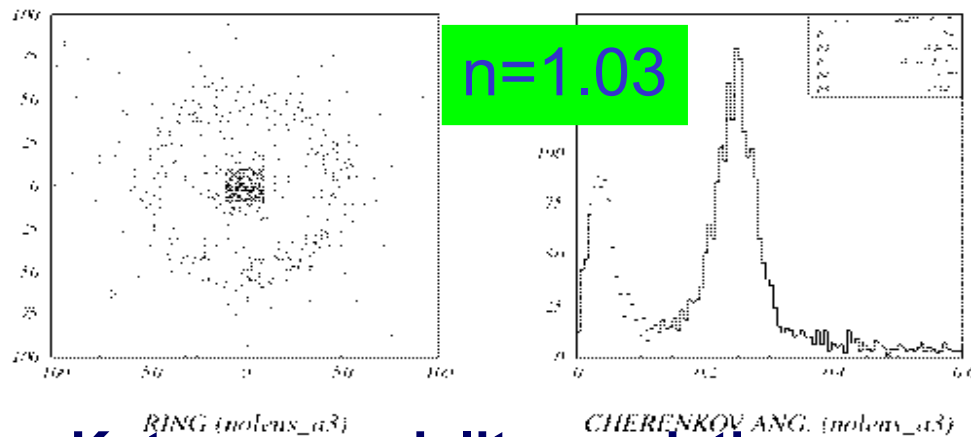
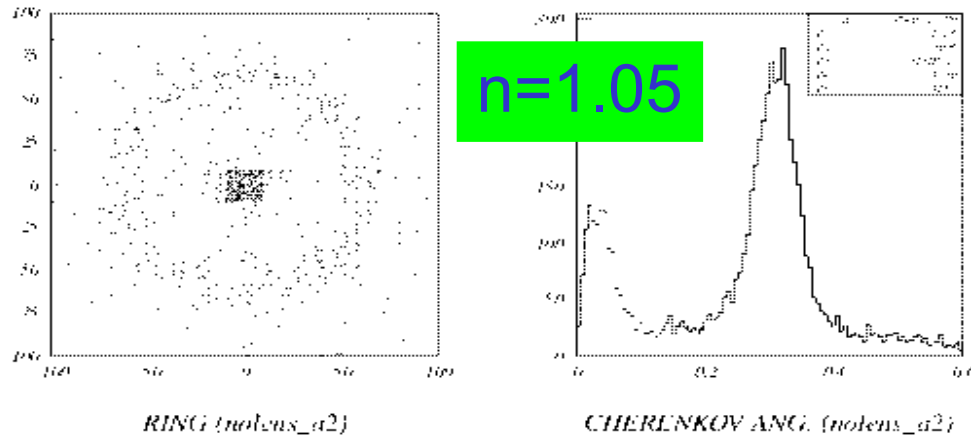
Predvidena lokacija Aerogel RICH v spektrometru BELLE



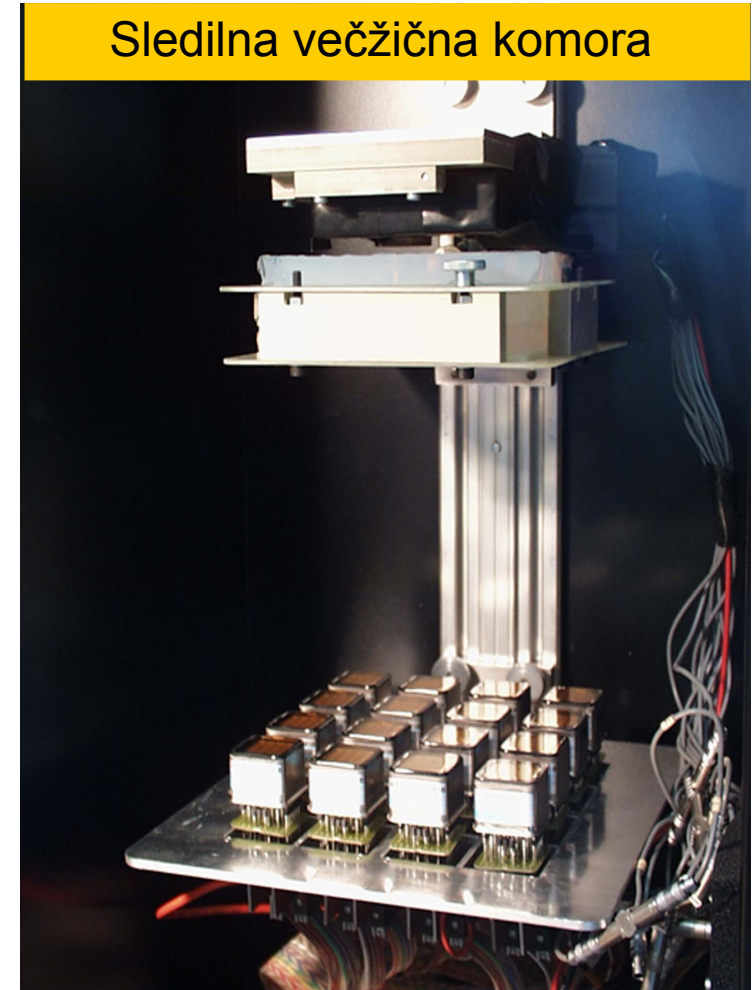
# Prvi testi s kozmičnimi delci

## I. 2001 na IJS

- Aerogeli iz KEKa
- Večanodne fotopomnoževalke iz HERA-B RICH



Sledilna večžična komora



**Kotna porazdelitev zadetkov**

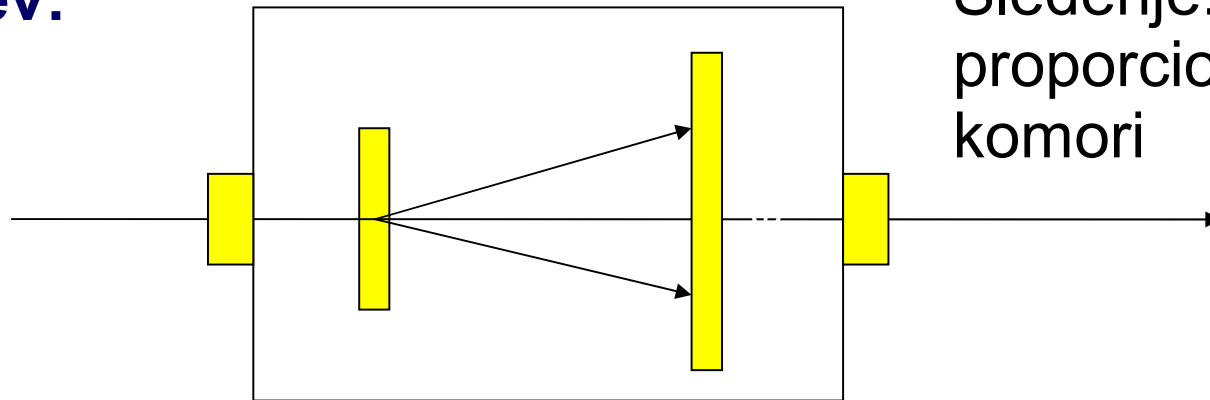


# Aerogelski RICH prvič v testnem žarku - potrditev principa detektorja Jesen 2001 v KEK-PS $\pi$ 2 žarku

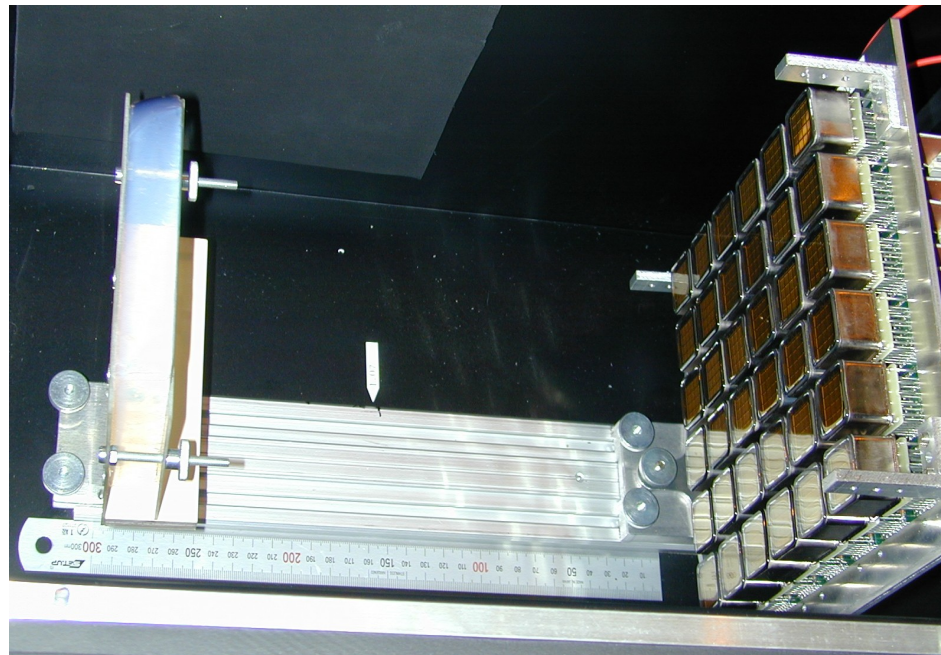
**postavitev:**

Sledenje: 2 večžični  
proporcionalni  
komori

Curek delcev



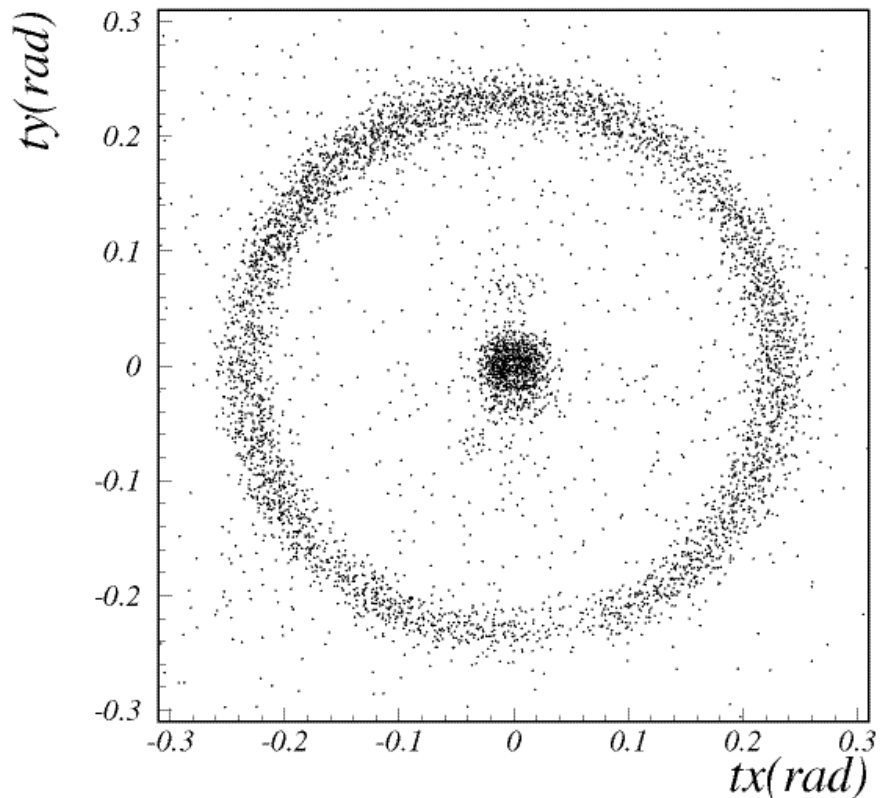
•36 večanodnih fotop. (R5900-M16) @ 30mm, 36% geo. izk, 192 čit.kanalov



# Prvi dogodki

- $\pi^-$  z gibalno količino 3GeV/c
- Aerogel  $n=1.029$   $d=2$  cm

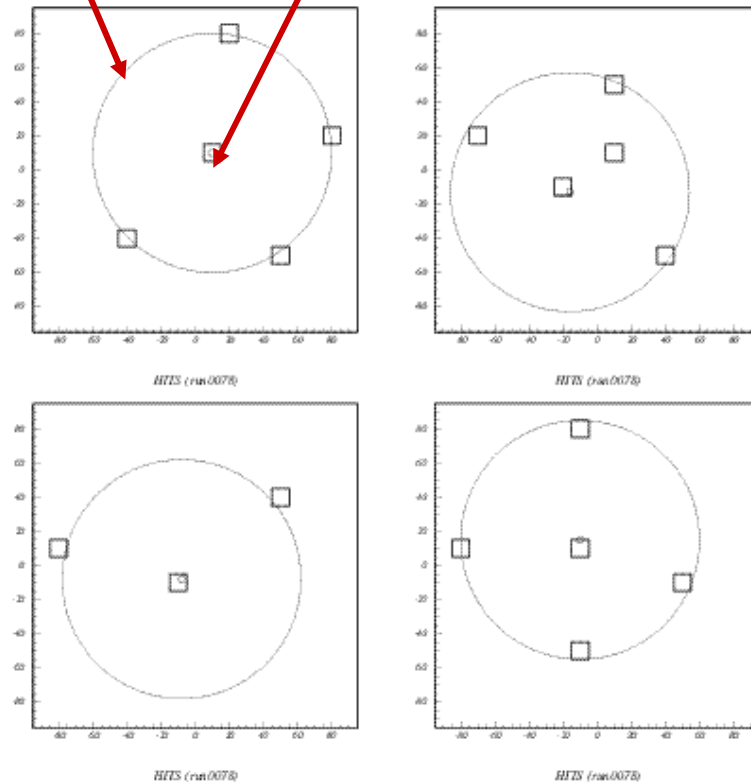
Kumulativna porazdelitev  
zadetkov v prostoru Čerenkova



Pričakovani položaj zadetkov  
glede na sledilni sistem

Zadetki nabitih delcev

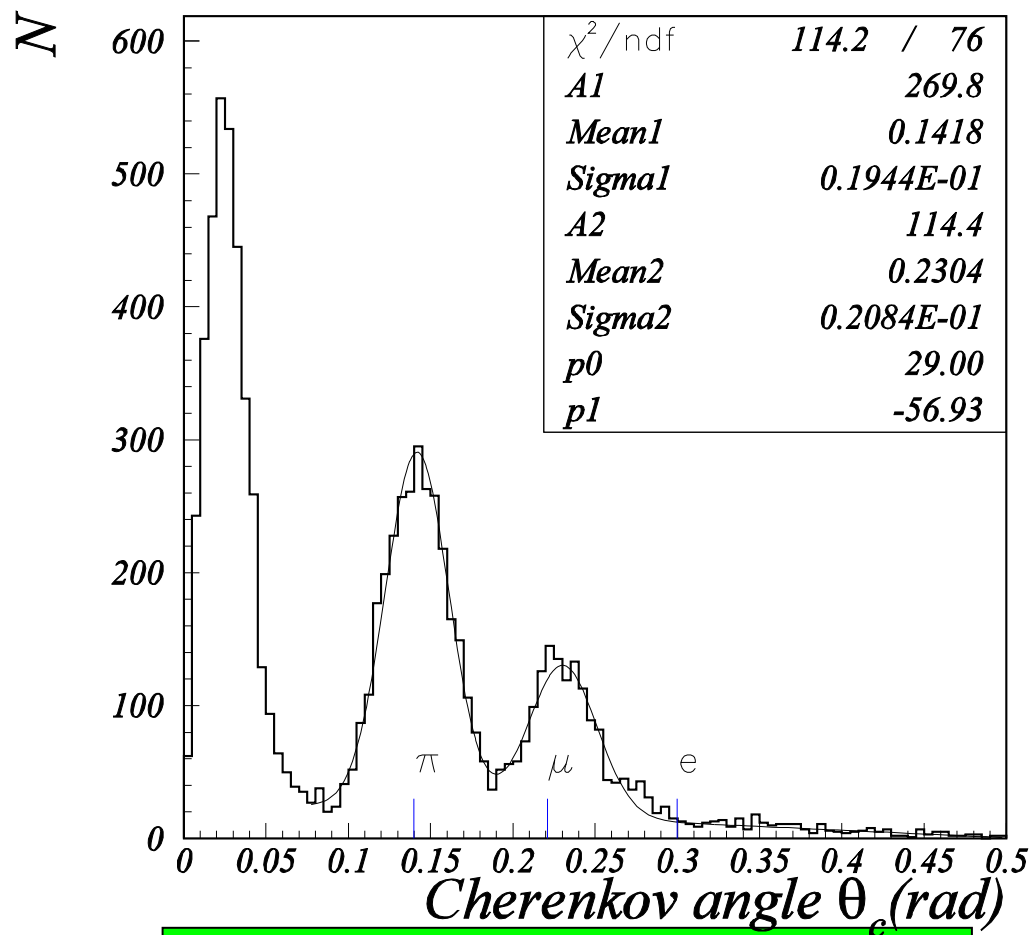
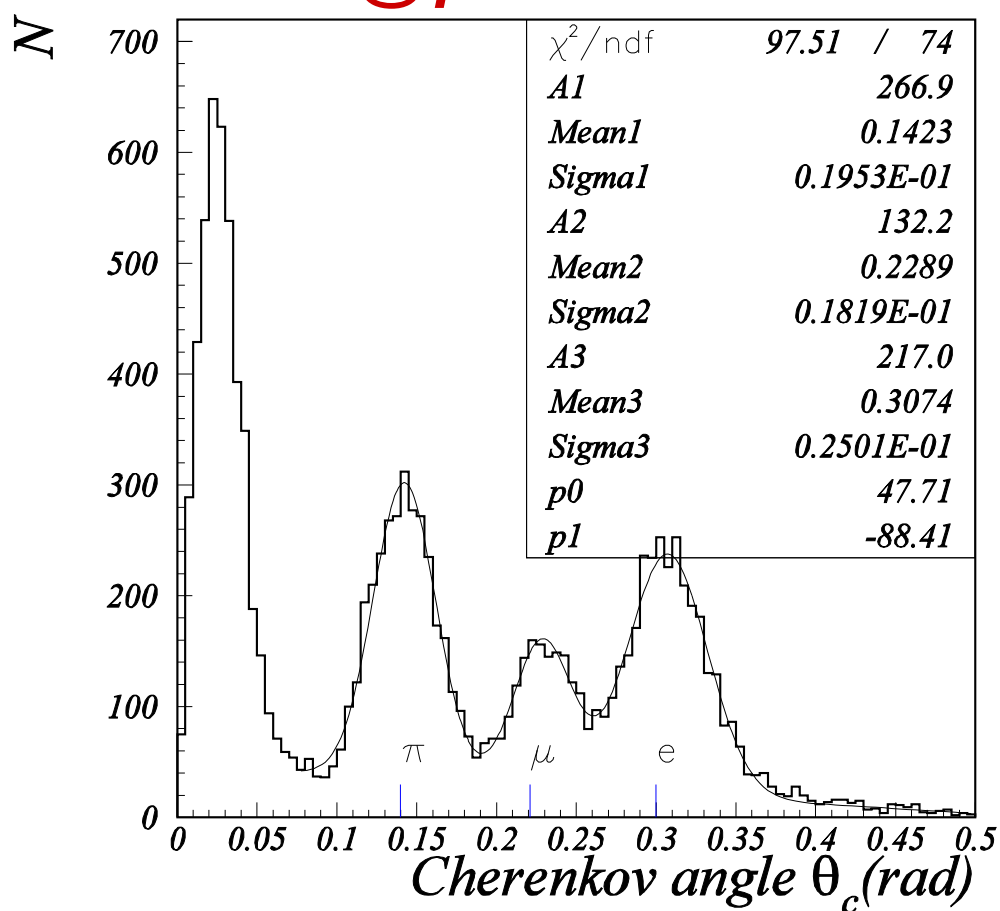
Tipični zadetki /dogodki



# Ločevanje delcev – demonstracija

- $e^-$ ,  $\mu^-$ ,  $\pi^-$

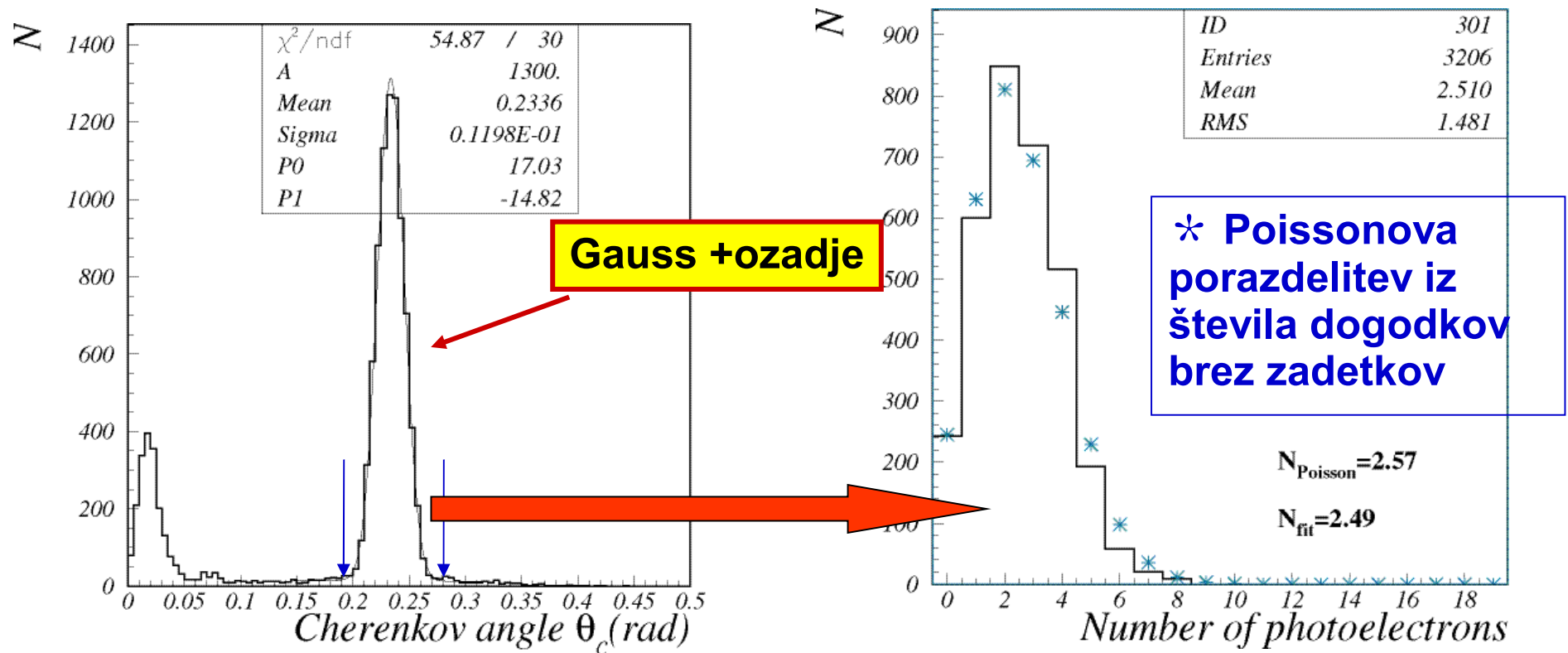
- **Podatki @  $p = 0.5 \text{ GeV}/c$**



Veto na elektrone z uporabo  
plinskega števca Čerenkova

# Rezultati

- $N_{\text{det}}$  &  $\sigma_{\theta}$  iz porazdelitve po kotu Čerenkova

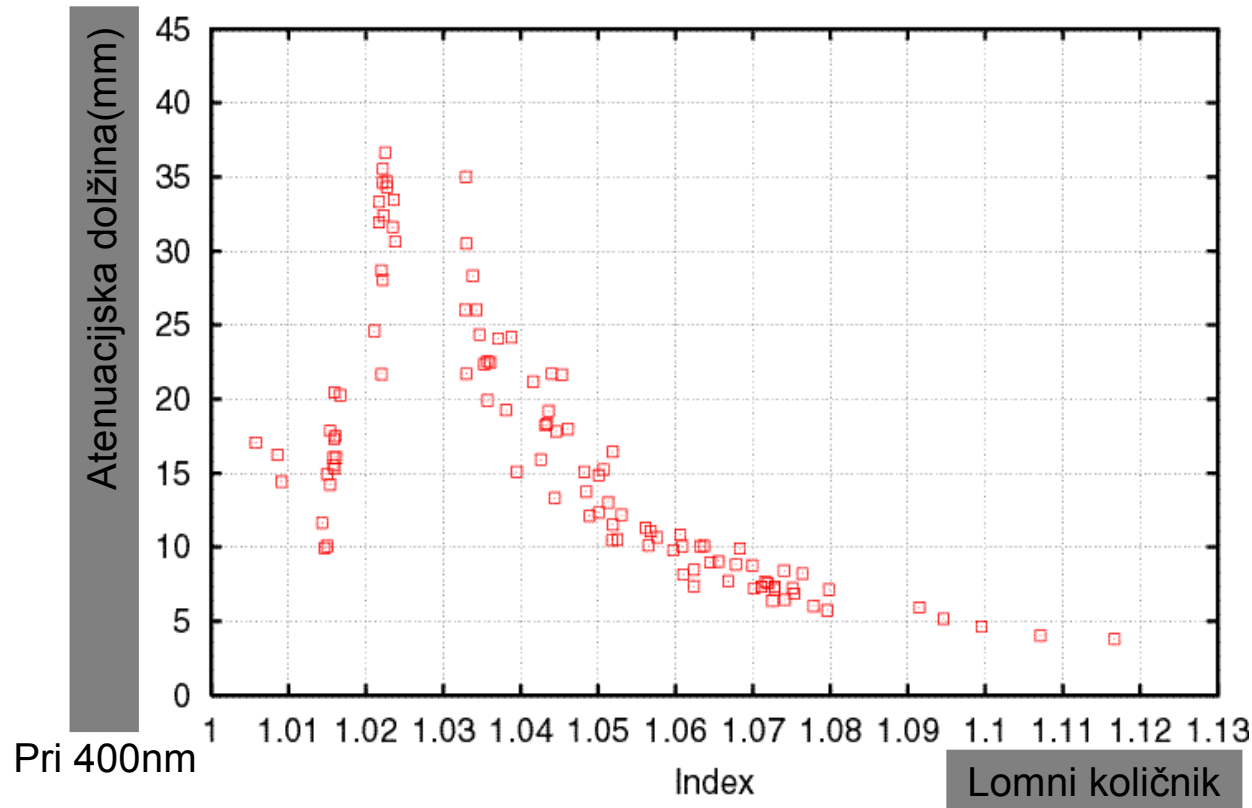


- Ločljivost v kotu Čerenkova za posamezne fotone boljša kot 10 mrad
- N fotonov v skladu s pričakovanji, ampak premajhno (2.7 / obroč) - Kaj zdaj?
  - Izboljšati prepustnost aerogela
  - Povečati fotoobčutljivo področje in s tem izkoristek za detekcijo fotonov

# Aerogel

Razvoj aerogela temelji na izkušnjah pridobljenih pri razvoju in vgradnji pragovnega števca Čerenkova (ACC)

- Hidrofobni aerogel
- Prepustnost optimizirana za  $n = 1.01-1.03$
- Masovna produkcija 7000 kosov aerogela  $10 \times 10 \times 2 \text{cm}^3$  v letih 1994-1997



Atenuacijska dolžina zaradi Rayleighejevega sipanja pade za  $n > 1.04$

~12mm za  $n=1.05$

→ Kako izboljšati?

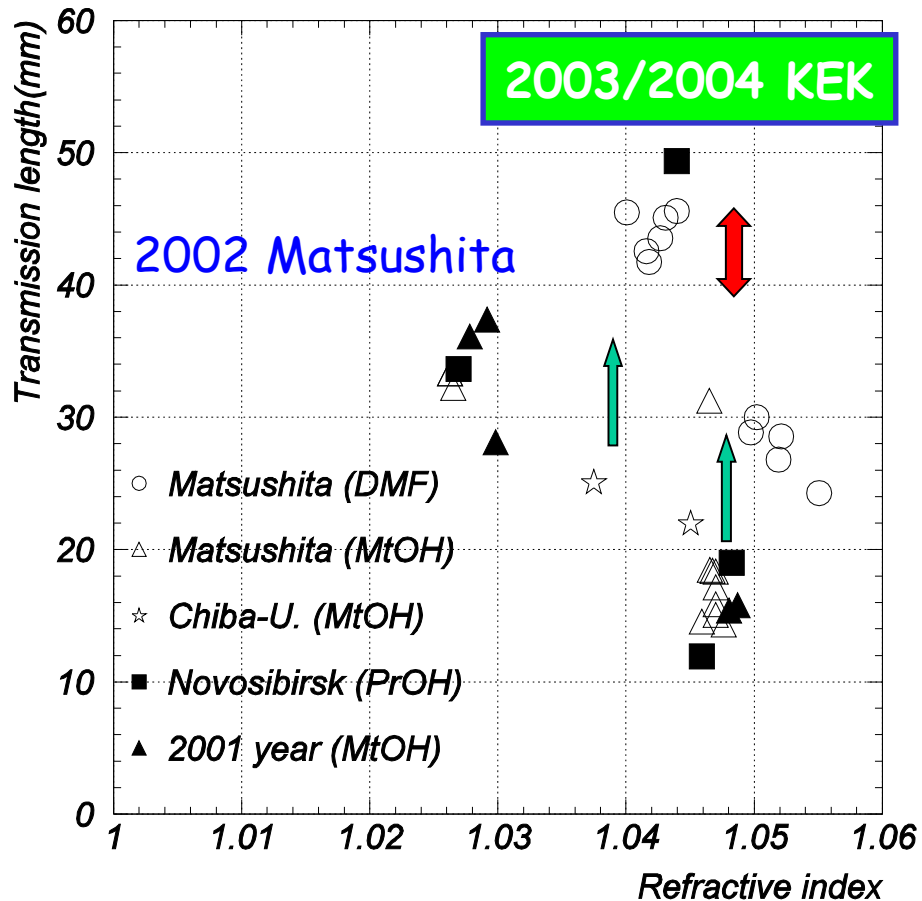


# Izboljšave aerogela

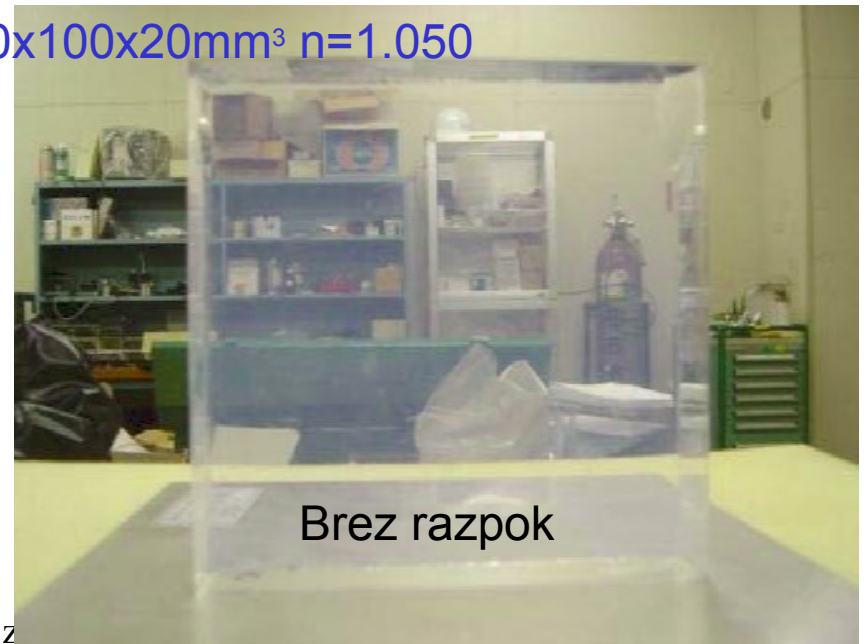
- Razvoj skupaj s koncernom Matsushita
- cilj: **boljše optične lastnosti za**
- **$n \sim 1.05$  hidrofobne aerogele**
- Novi začetni materiali in sprememba postopka

→ **izboljšanje:**

Atenuacijska dolžina @ 400 nm 40-45mm



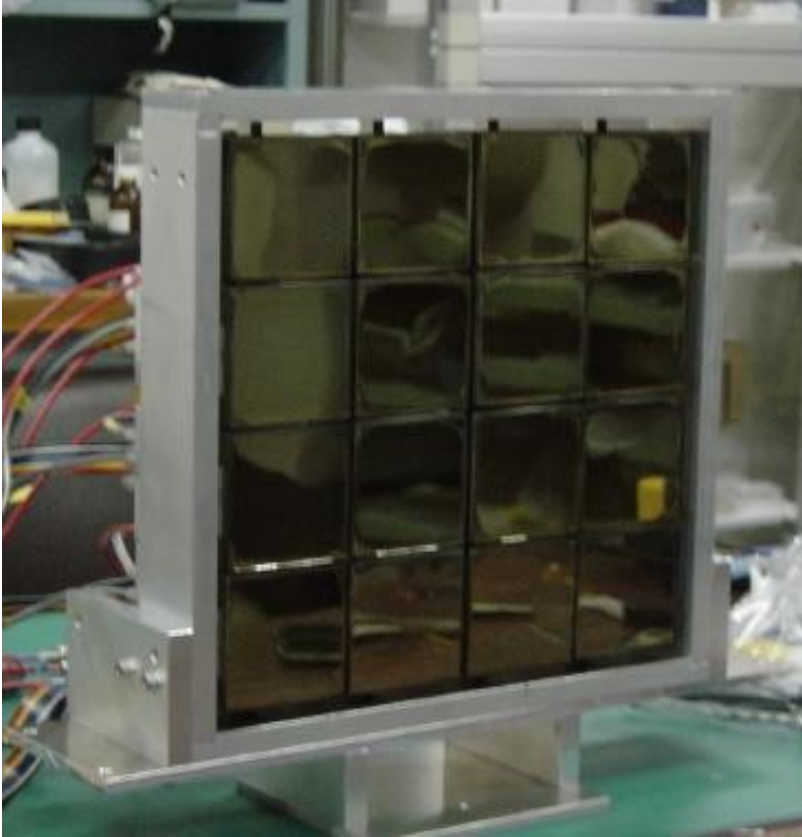
100x100x20mm<sup>3</sup> n=1.050



Brez razpok

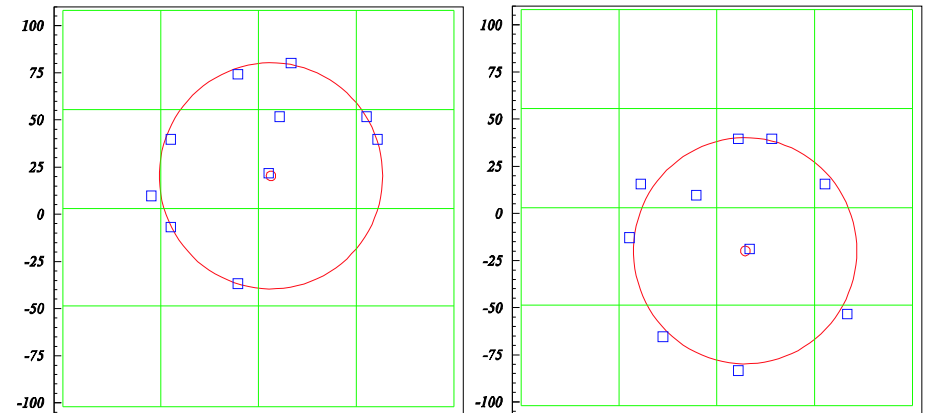
# Sistematične študije detektorja

## Testna žarka @ KEK-PS $\pi$ 2 in T1

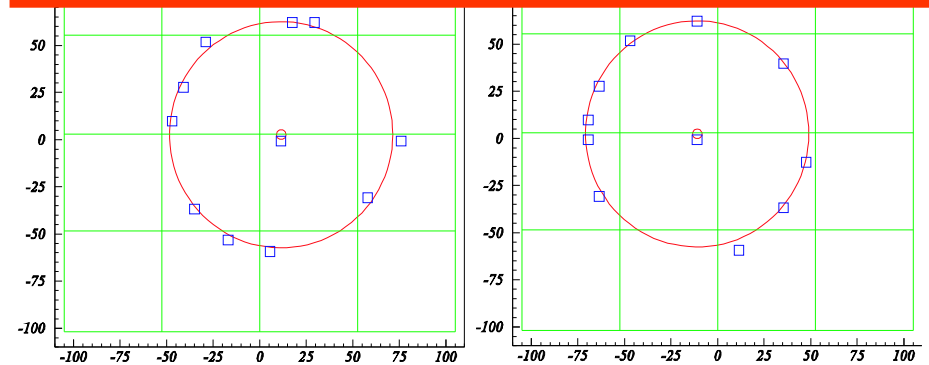


### Fotonski detektor:

- Mreža 4x4 Hamamatsu H8500
- 52.5 mm razmik (84% geo.izkoristek)
- 1024 kanalov



Čisti obroči, skorajda brez ozadja

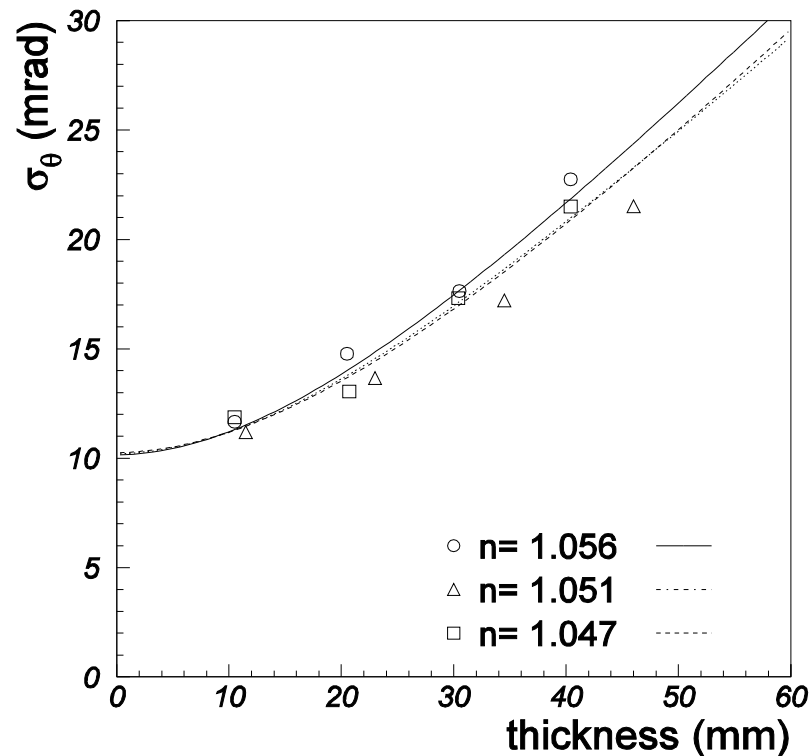


Ne deluje sicer v magnetnem polju,  
dober za razumevanje delovanja  
→ vmesni korak pri razvoju

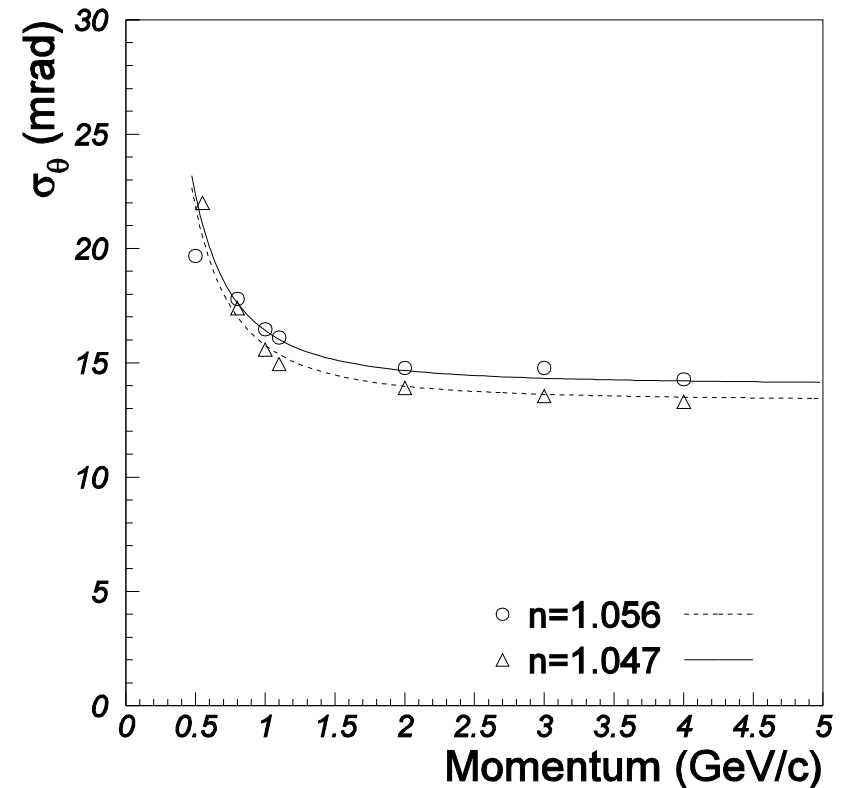
# Ločljivost v kotu Čerenkova za posamezne fotone

Tipično 13 mrad (za 2cm debel aerogel)

Kot funkcija debeline



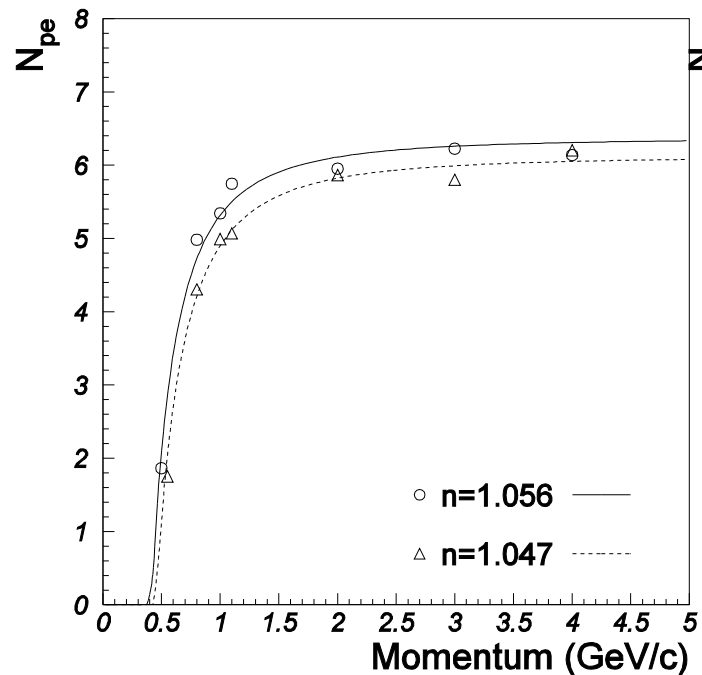
Kot funkcija debeline



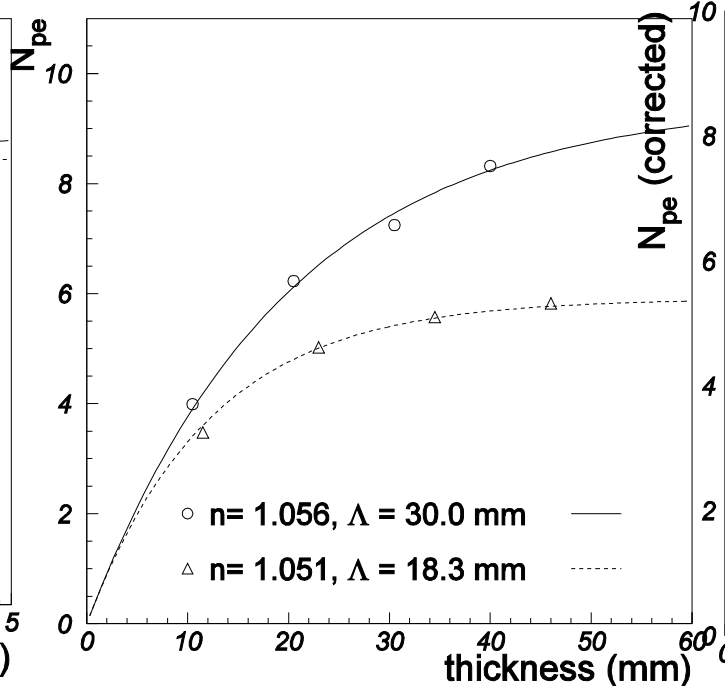
V grobem skladno s pričakovanji

# Število fotonov

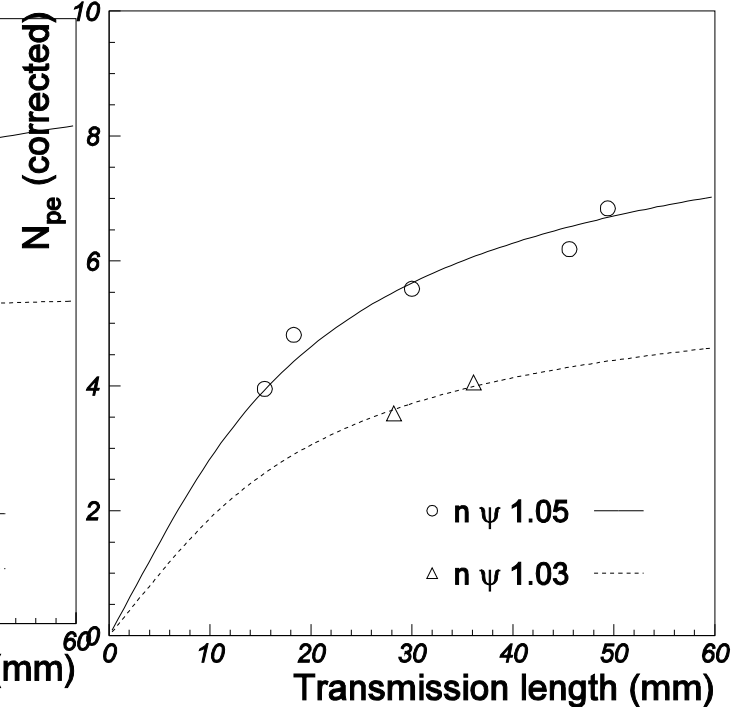
Kot funkcija  
gibalne količine



debeline aerogela

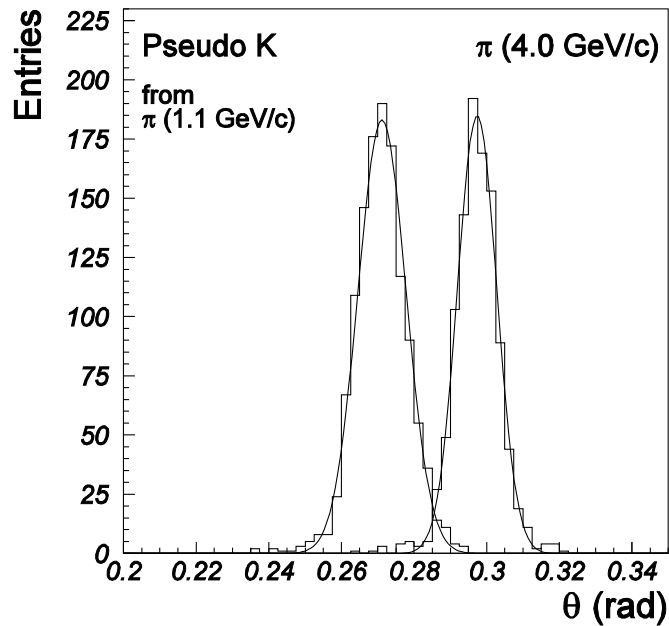


atenuacijske  
dolžine



Skladno s pričakovanji

# Simulacija identifikacijskih zmogljivosti na podatkih



Tipične vrednosti

$$N_{\text{det}} = 6 \quad \text{in} \quad \sigma_{\theta} = 13 \text{ mrad}$$

Ocena ločljivosti 5.3 mrad na nabit delec  
 $\rightarrow 4.3 \sigma$  za ločevanje  $\pi$  /K pri 4 GeV/c

Porazdelitvi po Čerenkovem kotu

- za pione pri 4GeV/c in
- 'kaone' (pioni pri 1.1GeV/c imajo enak kot Čerenkova kot kaoni pri 4GeV/c).



# Optimalna debelina aerogela

za posamezne fotone

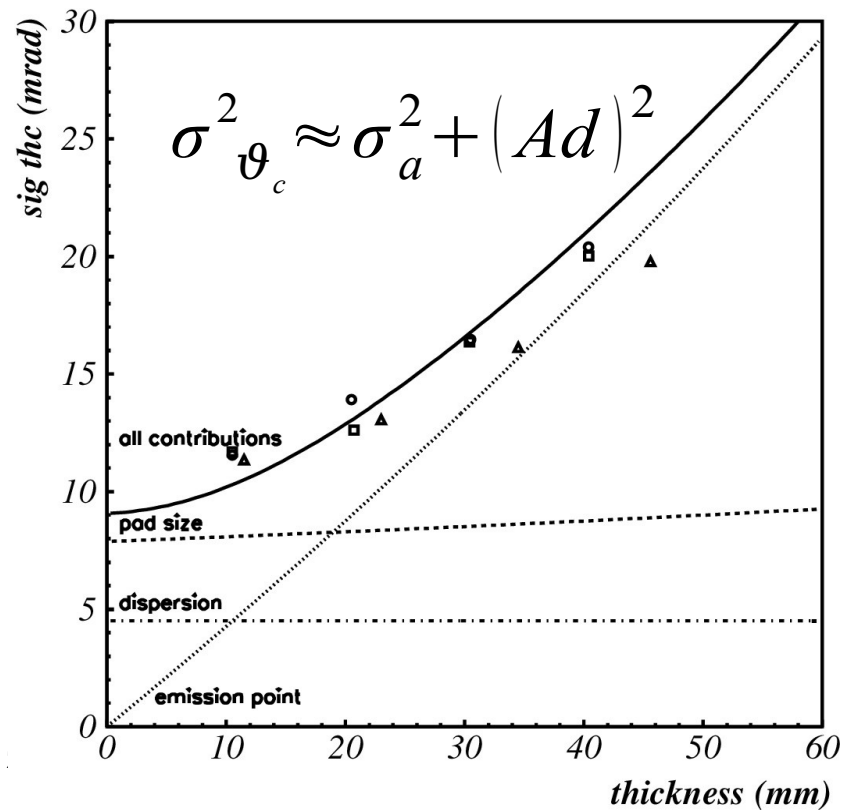
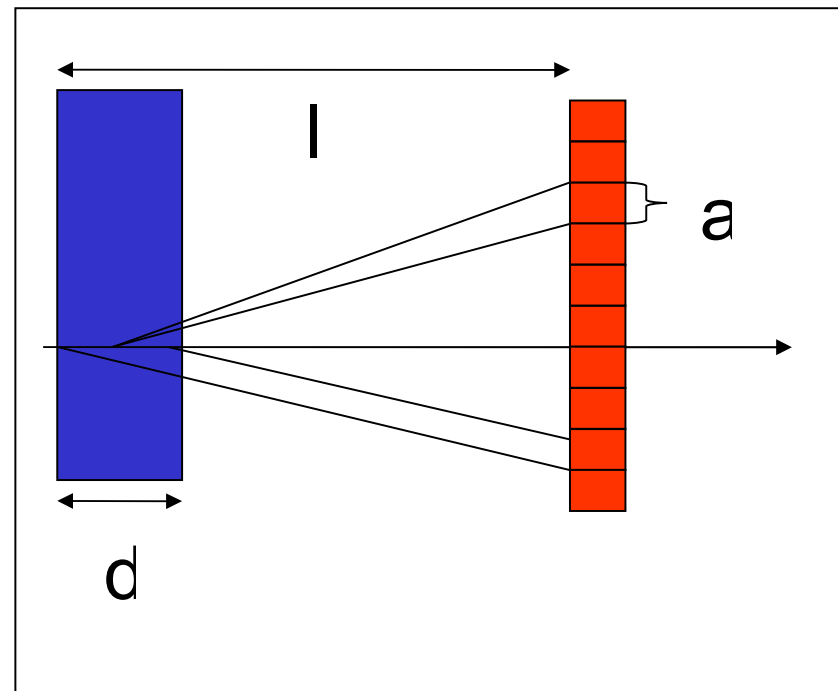
Dva glavna prispevka k ločljivosti v kotu Čerenkova  
( $n=1.05$ ,  $d=1\text{cm}$ )

- velikost kanala  $a$  (~6mm)

$$\sigma_a = \frac{\cos^2 \vartheta_c a}{\sqrt{12} \left( l - \frac{1}{2} d \right)} \approx 8 \text{ mrad}$$

- Debelina aerogela  $d$

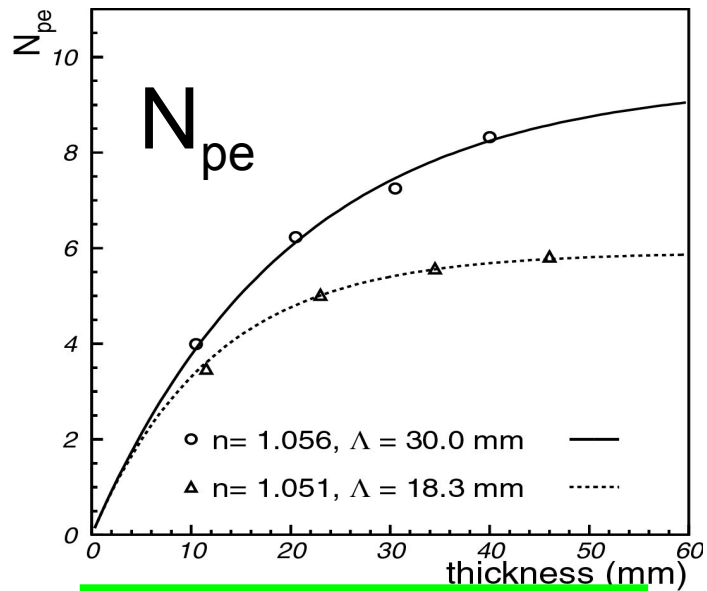
$$\sigma_d = \frac{\cos \vartheta_c \sin \vartheta_c d}{\sqrt{12} \left( l - \frac{1}{2} d \right)} \approx \frac{4 \text{ mrad}}{\text{cm}} d$$



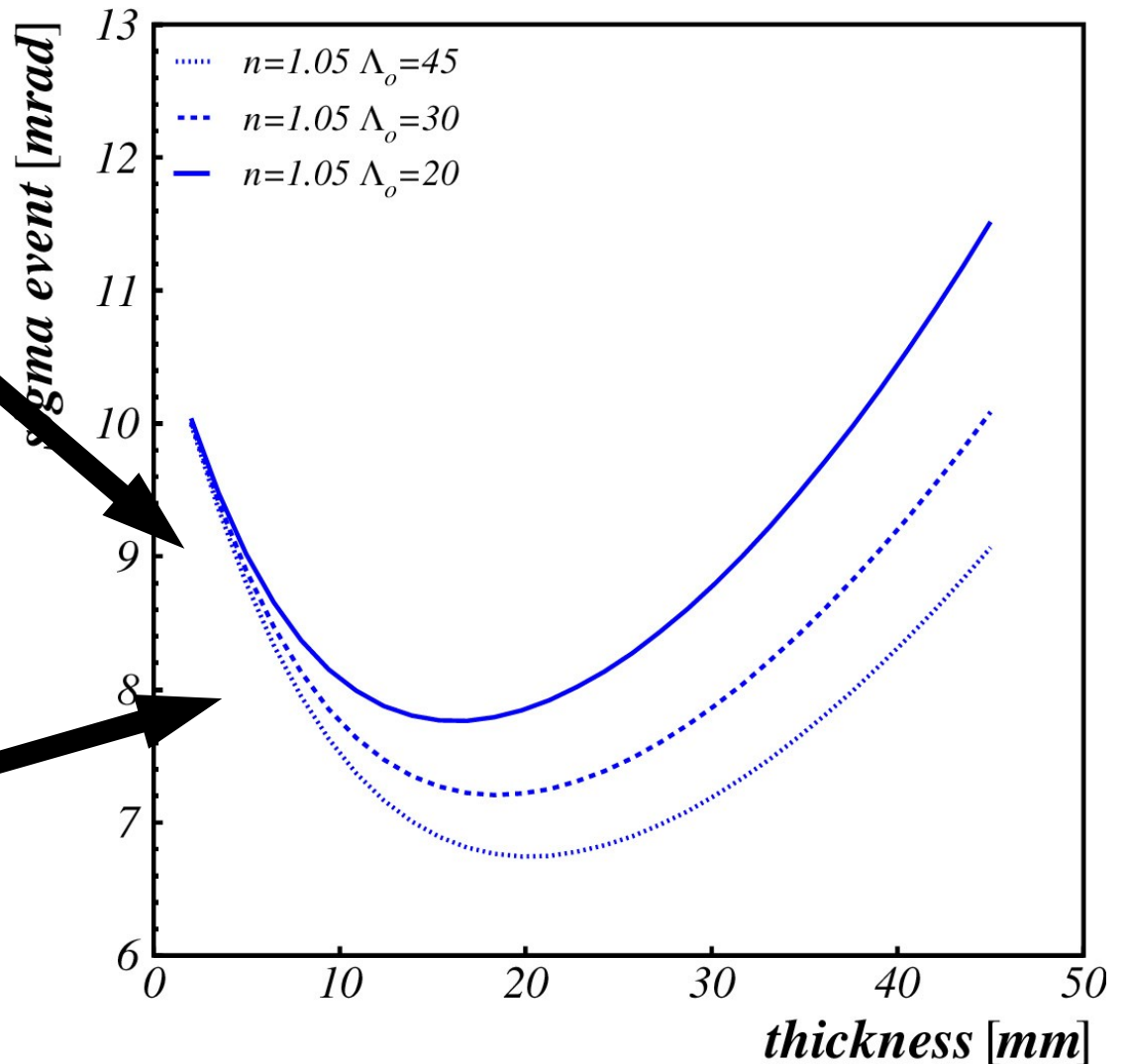
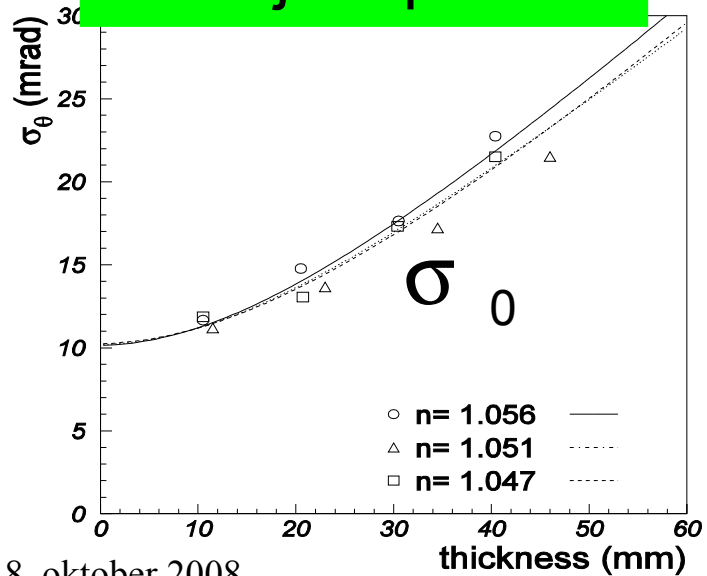
# Optimalna debelina aerogela

Ločljivost v kotu Čerenkova na sled

$$\sigma_{track} = \frac{\sigma_{\theta_c}}{\sqrt{N}}$$

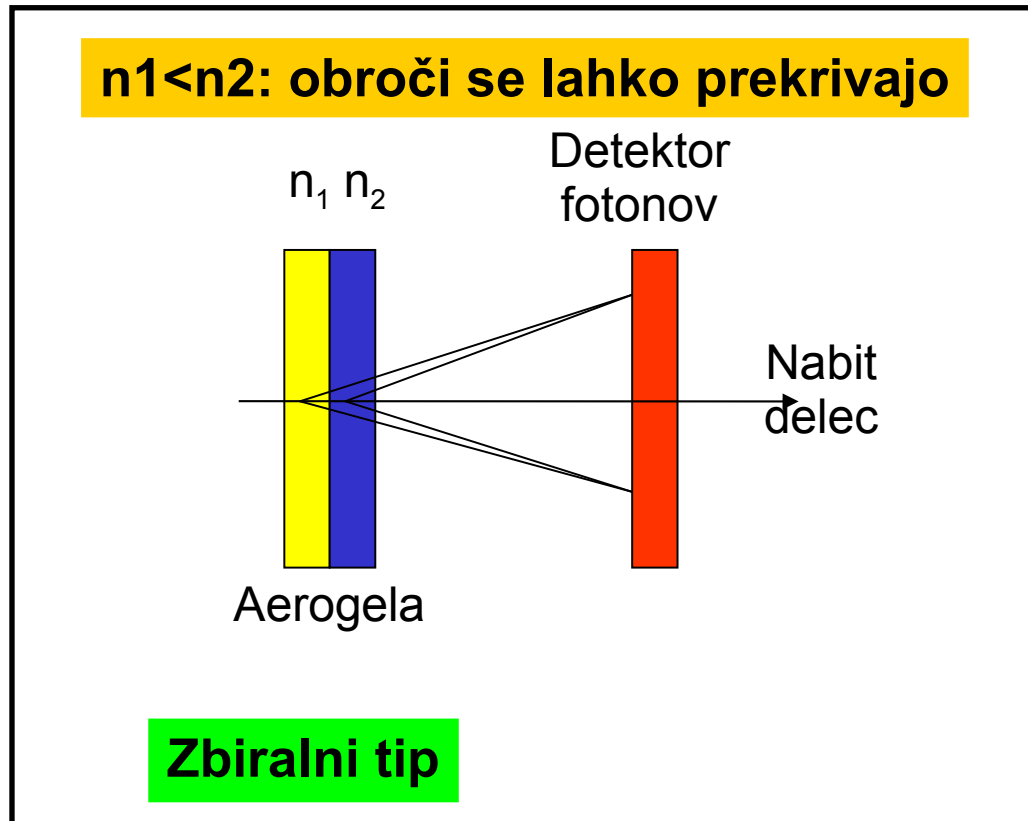


Izmerjeni podatki

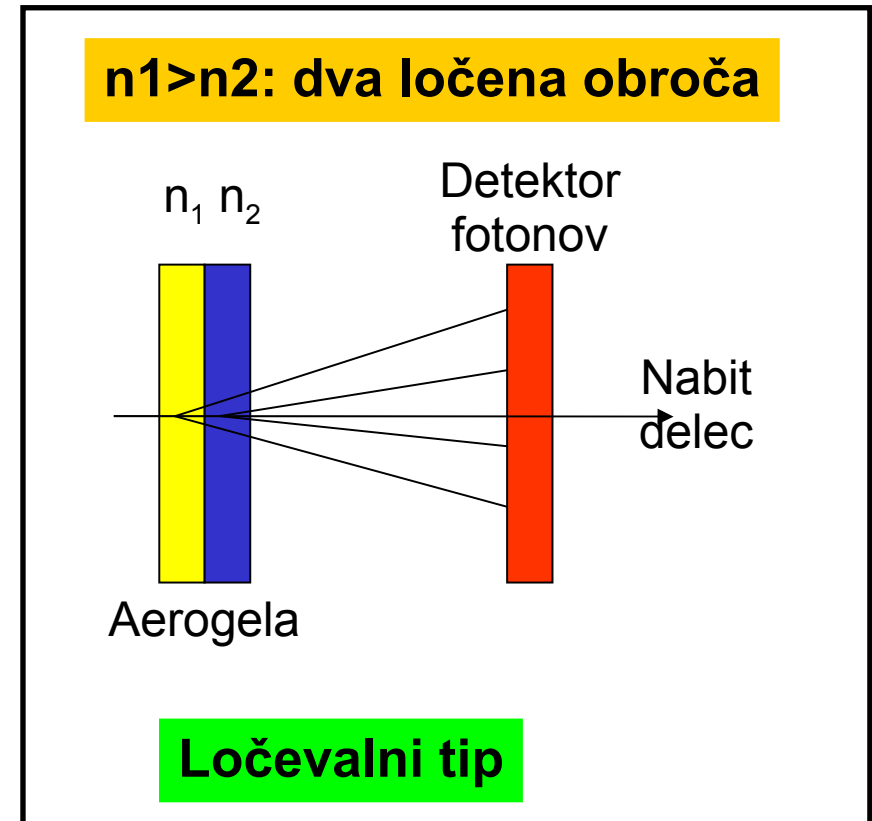


# Kako povečati število fotonov brez poslabšanja ločljivosti?

- Več fotonov: potrebujemo debelejši sevalec → slabša ločljivost
- Druga pot: uporabimo dva sevalca



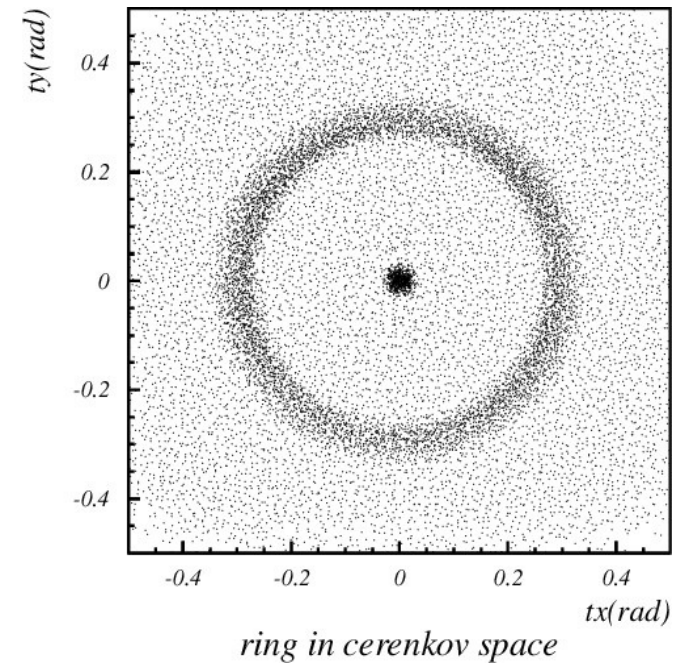
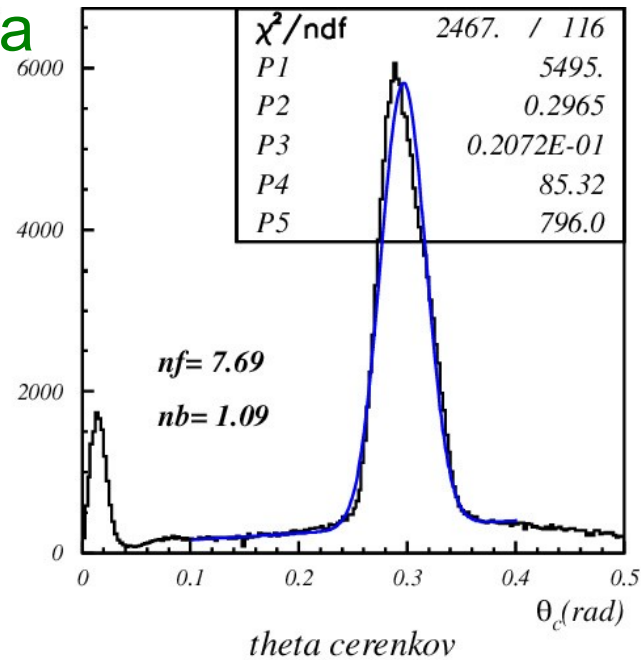
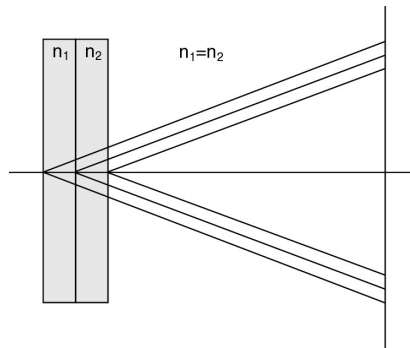
Izmeri en prekrivajoč se obroč



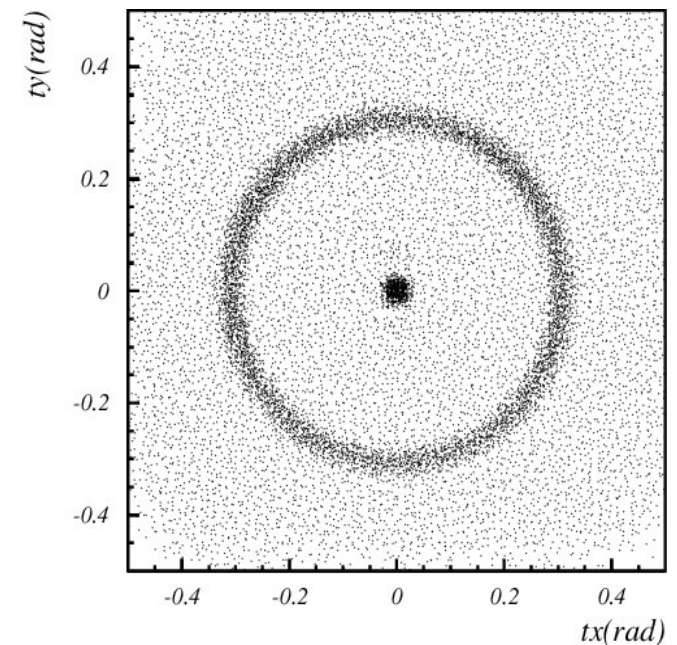
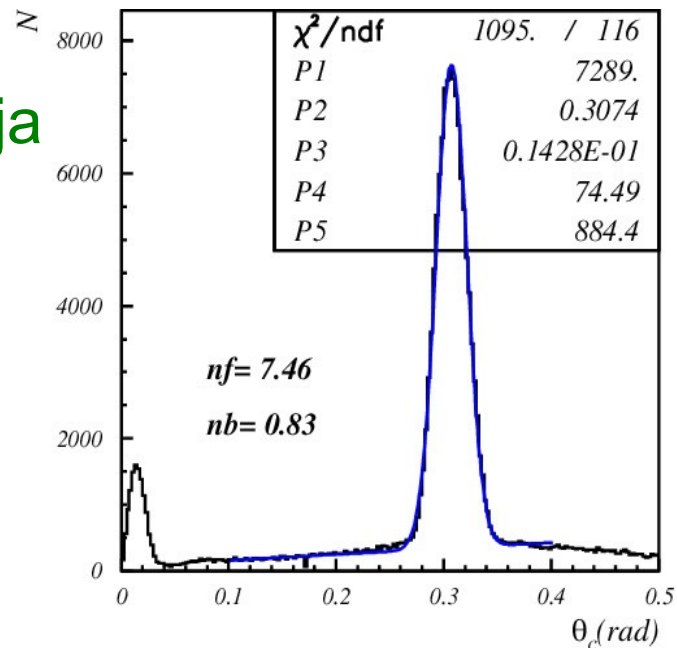
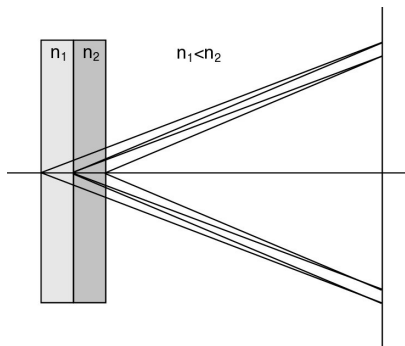
Izmeri dva obroča

# Zbiralni tip: izmerjeno izboljšanje ločljivosti

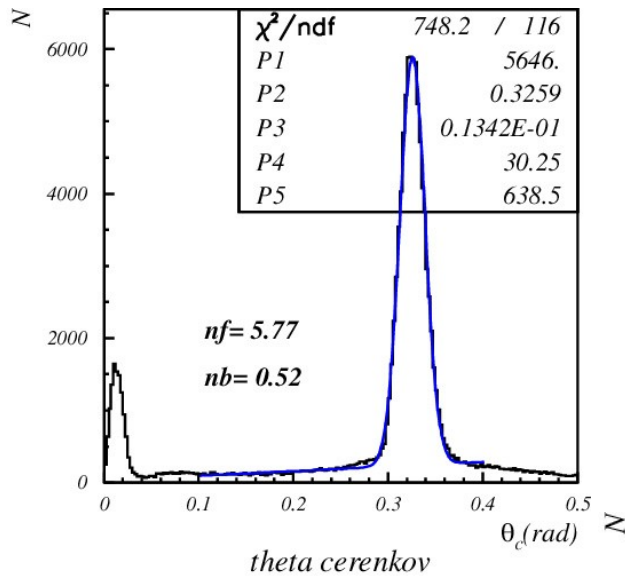
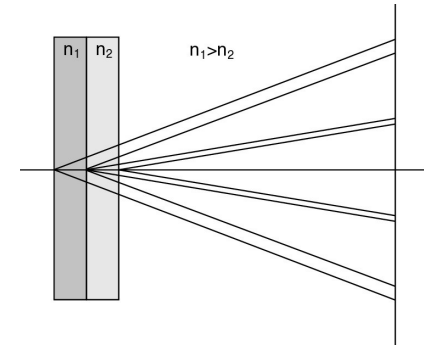
- Normalna konfiguracija  
4cm aerogela



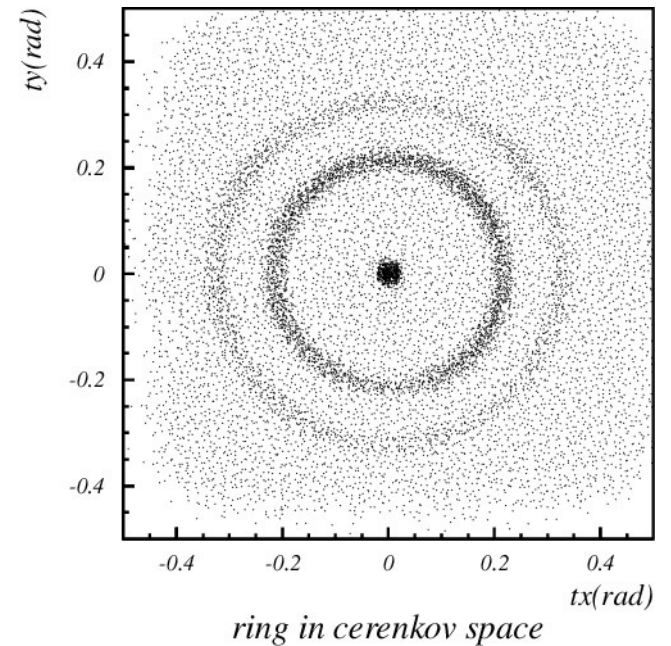
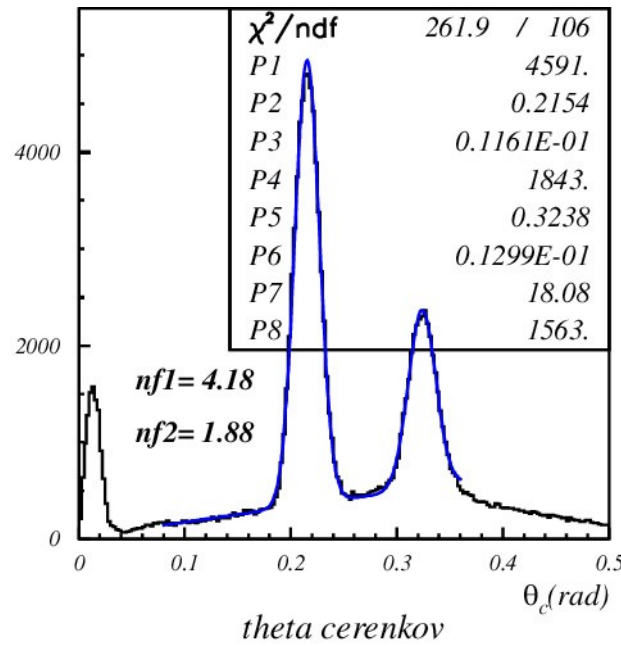
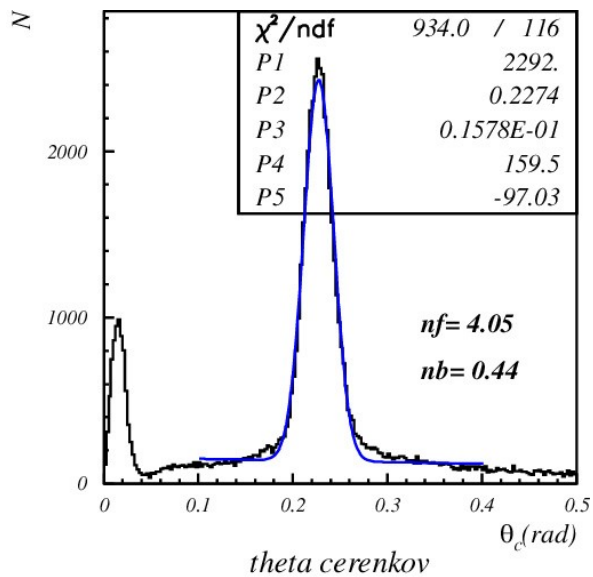
- Zbiralna konfiguracija  
2+2cm aerogela



# Ločevalni tip @ 3 GeV/c, meritev



• 2 ločena obroča  
 • Zaradi absorbcije znižanje prvega vrha





# MC Simulacija ločevanja

Funkcija največje zanesljivosti za različne hipoteze

$$L_K - L_\pi$$

- razlika log likelihooda za kaonsko in pionsko hipotezo

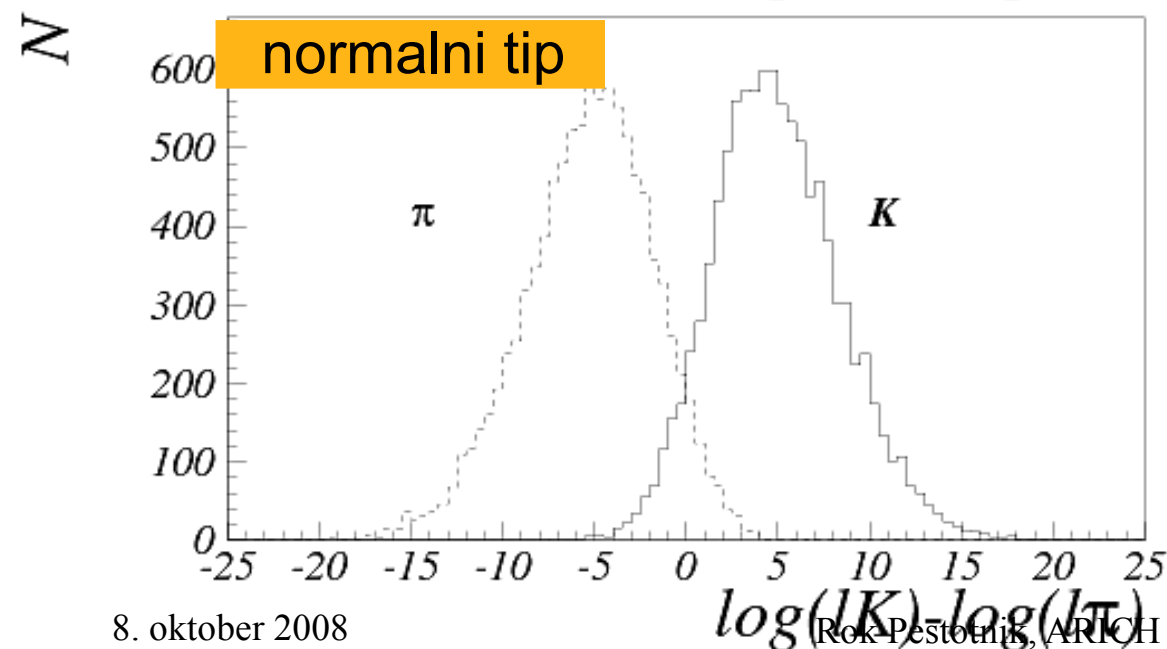
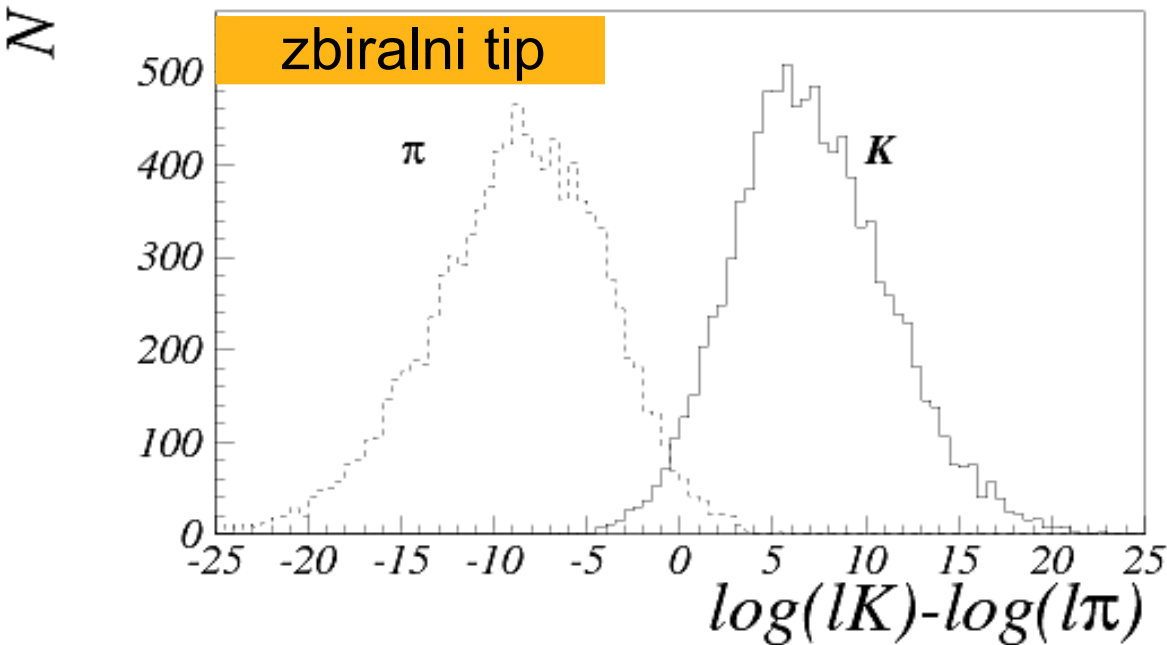
Primer pri 4 GeV/c

- $n_1=1.043$   $n_2=1.05$

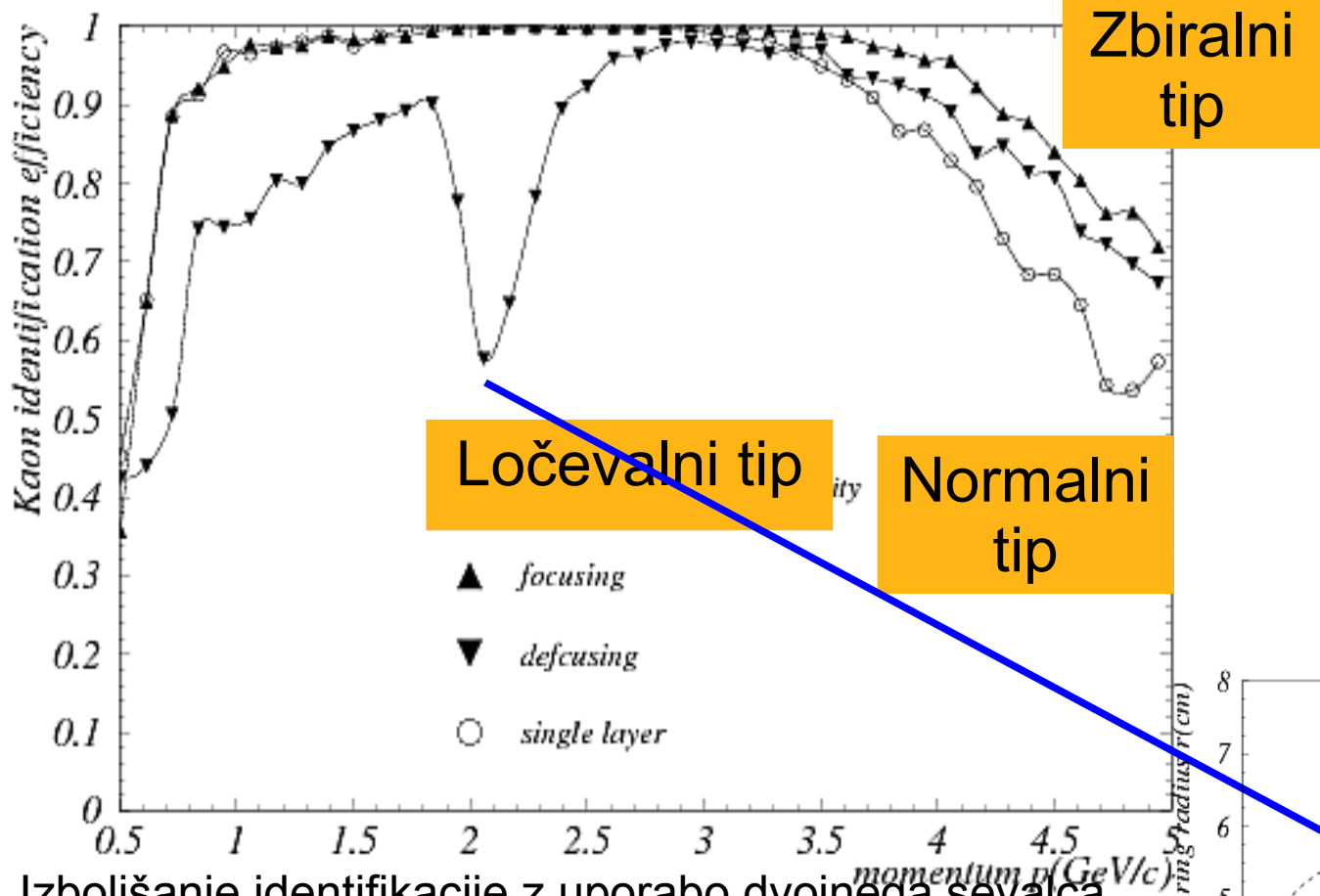
- $d=15$  mm+ $15$  mm

- $n_1=1.05$

- $d=30$  mm

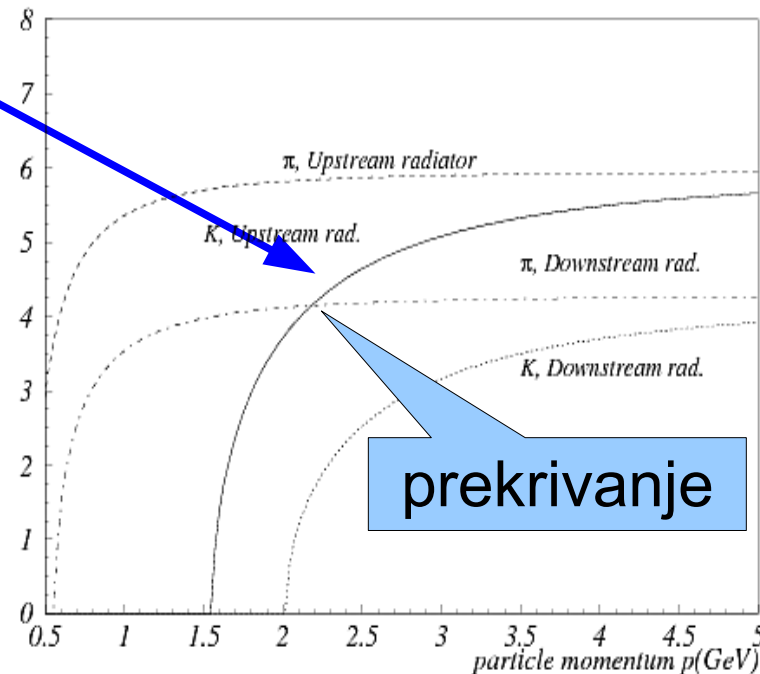


# Izkoristek za različne konfiguracije



Izkoristki pri 1% napačni identifikaciji

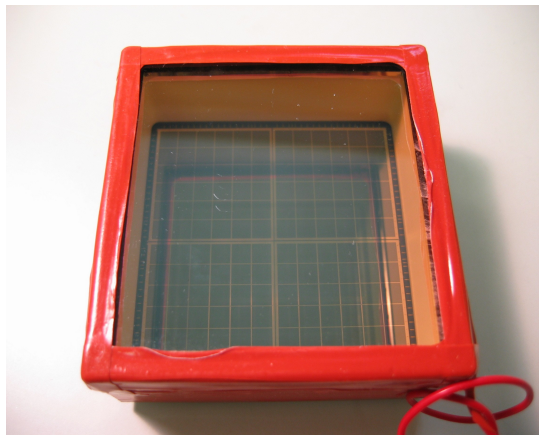
- Izboljšanje identifikacije z uporabo dvojnega sevalca
- Ločevalni tip ima:
  - nižji izkoristek pri nizkih gib.kol.
  - Padec v izkoristku, kjer se obroča iz različnih plasti prekrivata



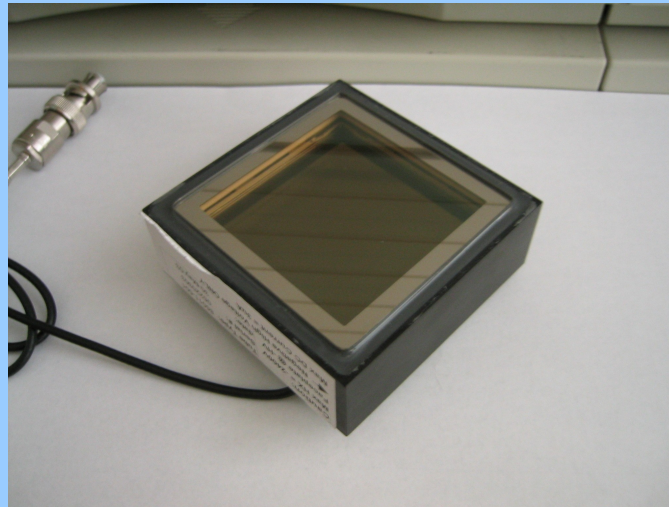
# Fotonski detektorji za visoka magnetna polja 1.5 T

## Več možnosti

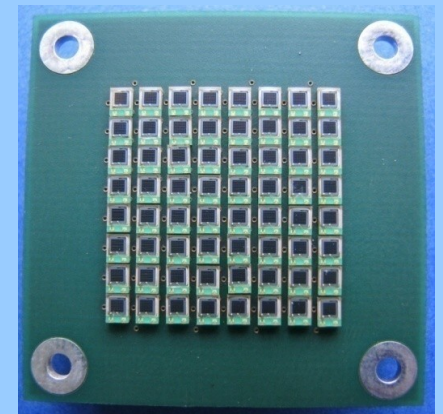
144 kanalna HAPD  
(Hybrid Avalanche Photo  
Detector)



64 kanalna MCP-PMT  
fotopomnoževalka z  
mikrokanalnimi ploščami



SiPM  
silicijeva  
fotopomnoževalka



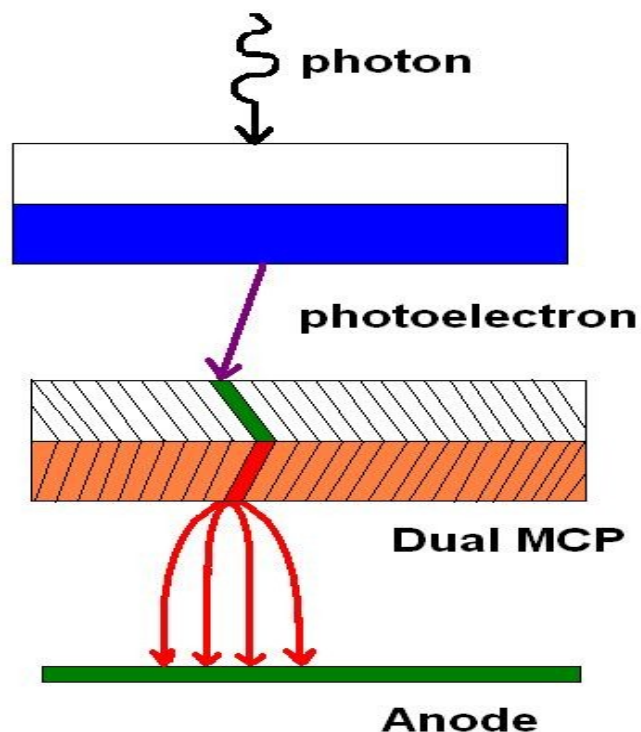
Težišče dela v Ljubljani

# MCP

## Burle 85011 MCP-PMT



- večanodna PMT z dvema mikrokanalnima stopnjama
- S porami velikosti  $10 \mu\text{m}$
- bialkali fotokatoda
- ojačenje  $\sim 0.6 \times 10^6$
- Zunanje dimenzije  $\sim 59 \times 59 \text{mm}^2$
- 64(8x8) anodnih kanalov
- Velikost kanalov  $\sim 6.5 \text{mm}$
- Geometrijski izkoristek  $\sim 80\%$



# BURLE MCP-PMT

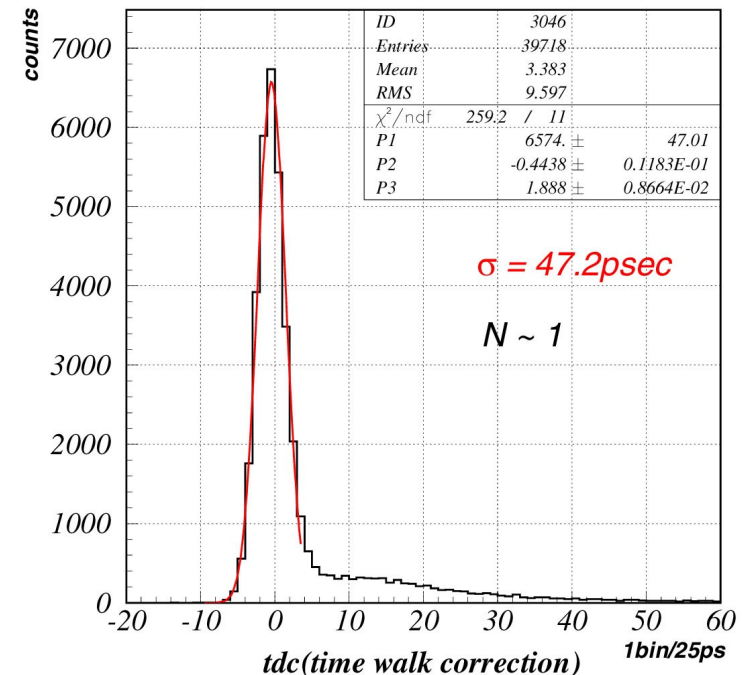
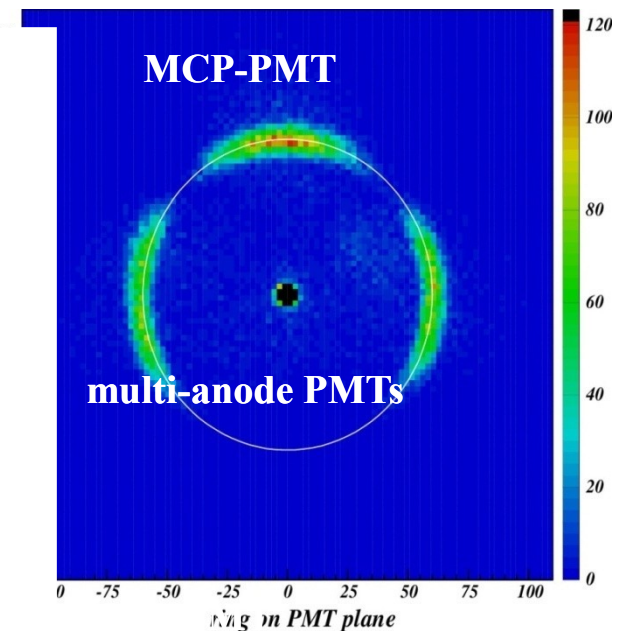
Odlično obnašanje v testnem žarku:

- $\sigma \sim 13$  mrad (posamezne gruče)
- št. gruč na sled  $N \sim 4.5$ 
  - $\sigma \sim 6$  mrad (na sled)
  - ločevanje  $\pi/K$   $4\sigma$  pri 4 GeV/c

Novejša verzija ima večji  $\epsilon_{\text{geo}}$  in  $\epsilon_{\text{zbiralni}}$

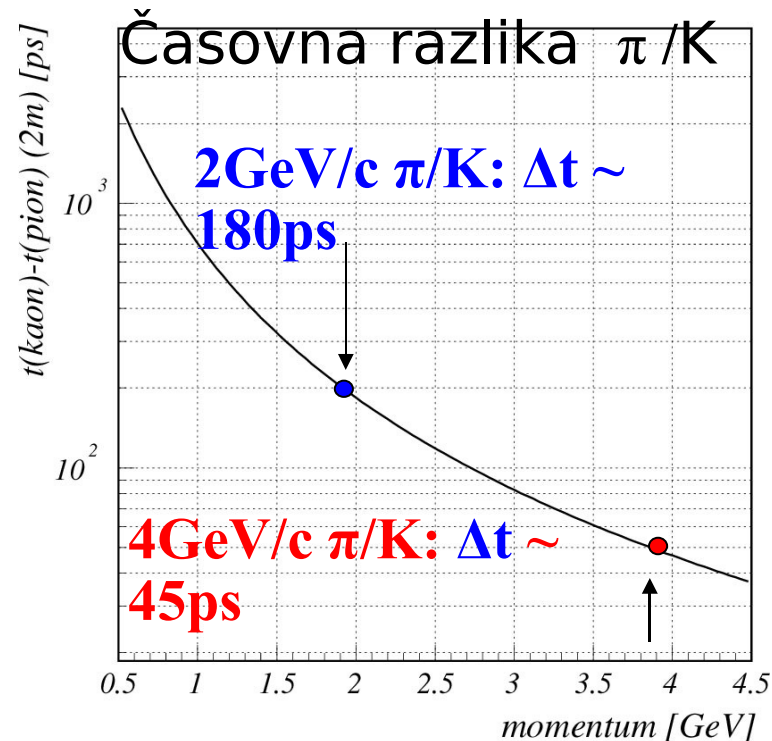
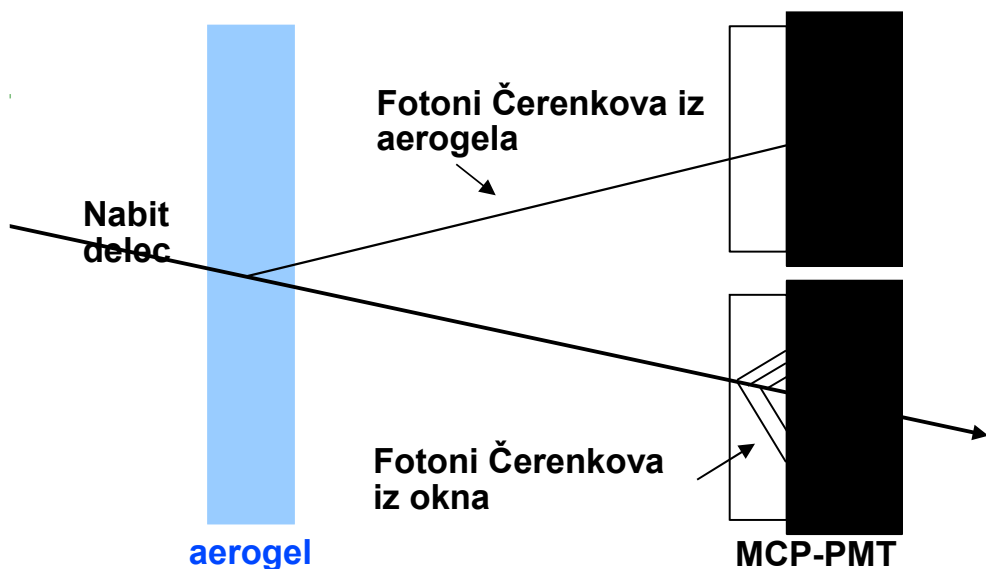
→ pričakujemo 8 gruč na sled

Zelo hiter ( $\sigma = 50$  ps za posamezne fotone)





# Meritev časa preleta z RICH

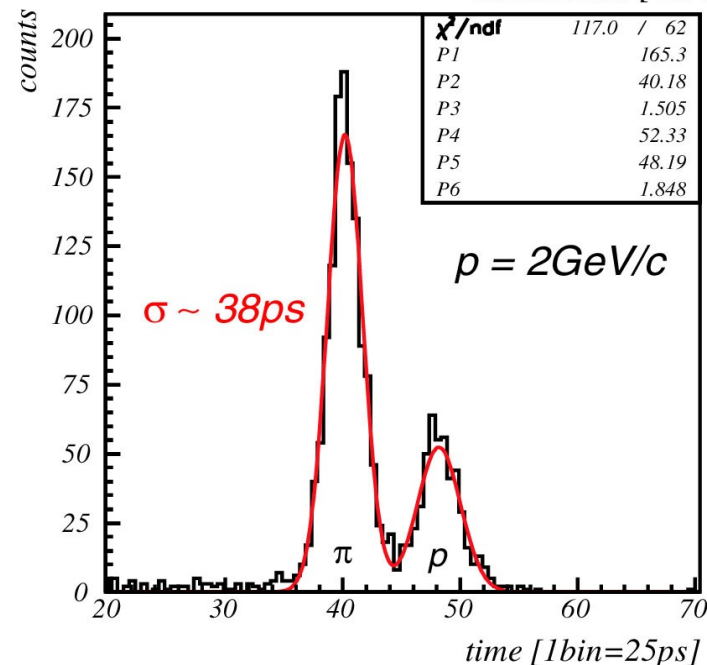


Za meritev uporabimo fotone Čerenkova ( $\sim 15$ ), ki nastanejo v 2mm oknu fotopomnoževalke  
 $\rightarrow$  pričakovana ločljivost  $\sim 35$  ps

Rezultati v testnem žarku  $\rightarrow$

- razdalja med START in STOP števcem 0.65 m
- v pravem detektorju 3x večja razdalja

Prag za sevanje Čerenkova je v steklu dosti nižje kot v aerogelu  $\rightarrow$  Možna pozitivna identifikacija



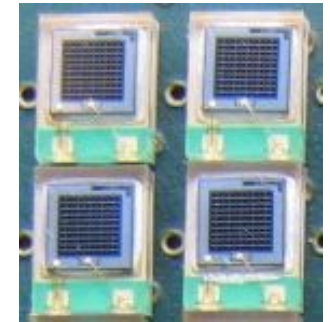
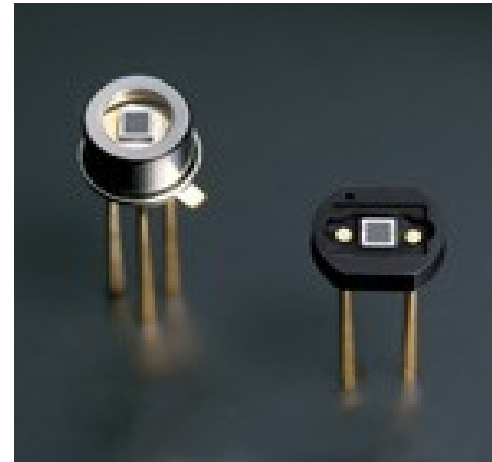
# Silicijeve fotopomnoževalke za RICH

## Lastnosti:

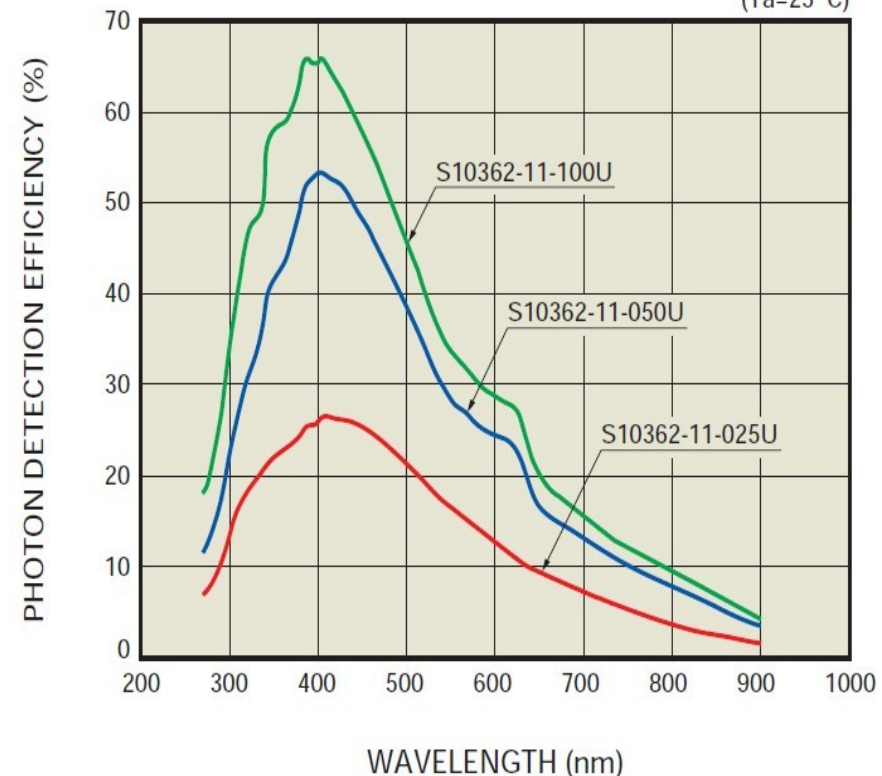
- Nizka napajalna napetost ~ (10-100)V
- Ojačenje ~  $10^6$
- PDE v vrhu do 65% (@400nm)  
$$\text{PDE} = \text{QE} \times \varepsilon_{\text{geiger}} \times \varepsilon_{\text{geo}}$$
- Časovna ločljivost ~ 100ps
- Delujejo v magnetnem polju
- Temni šum ~ nekaj 100kHz/mm<sup>2</sup>
- Radiacijske poškodbe (p,n)

## Uporaba za RICH:

- Detekcija posameznih fotonov
- Linearnosti ne potrebujemo
- Zaradi večjega izkoristka izberemo HC100
- Za povečanje izkoristka – svetlobni vodniki

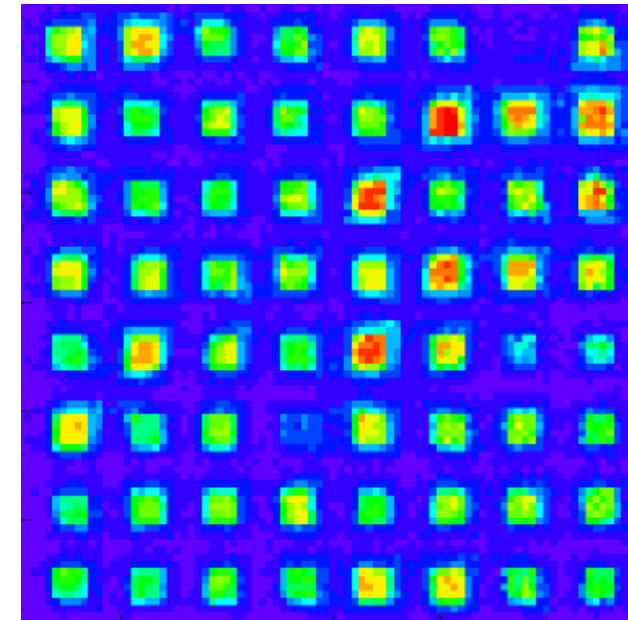
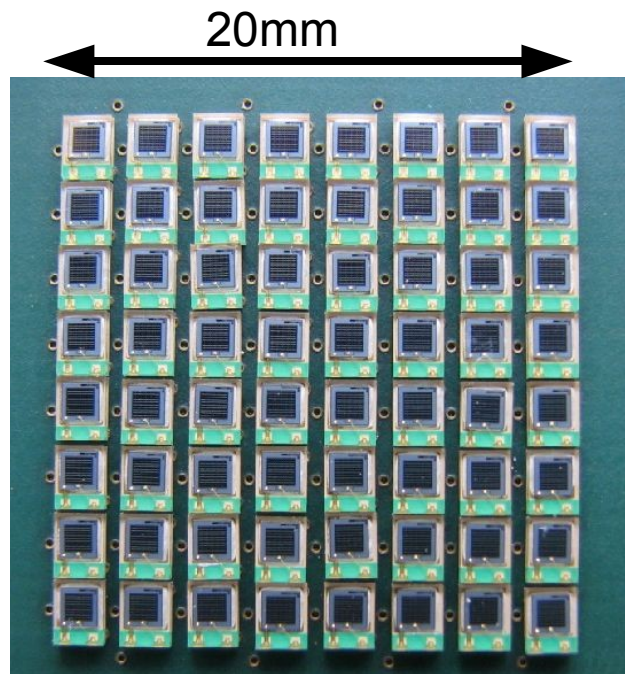
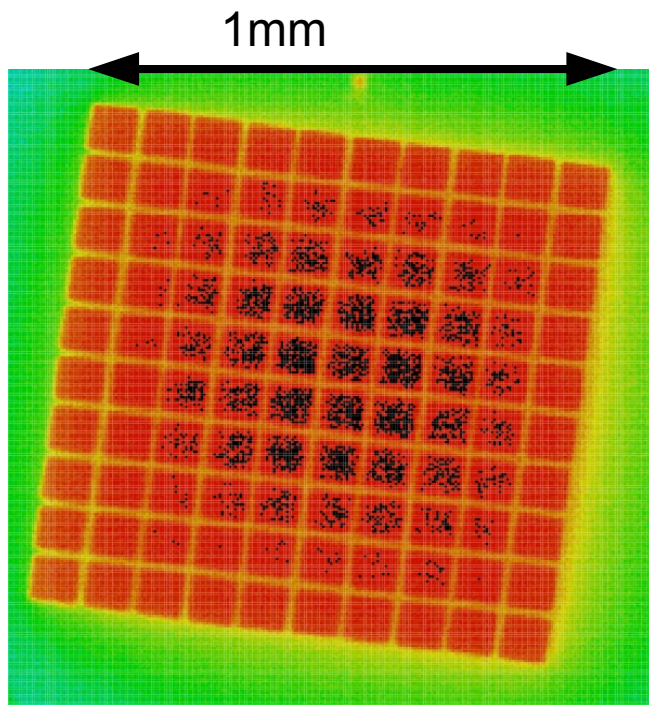


Hamamatsu: HC100, HC050, HC025 (Ta=25 °C)





# Silicijeve fotopomnoževalke

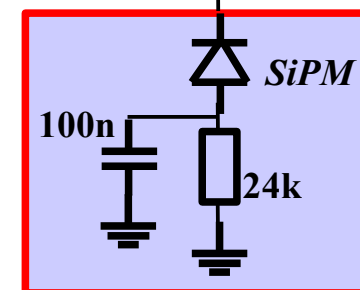
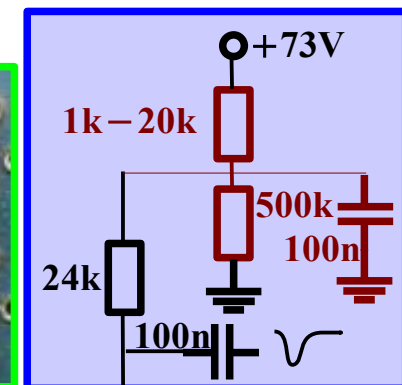
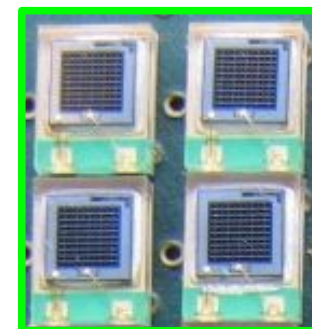


Iz 64  $1\text{mm}^2$  SMD SiPM smo izdelali modul iz

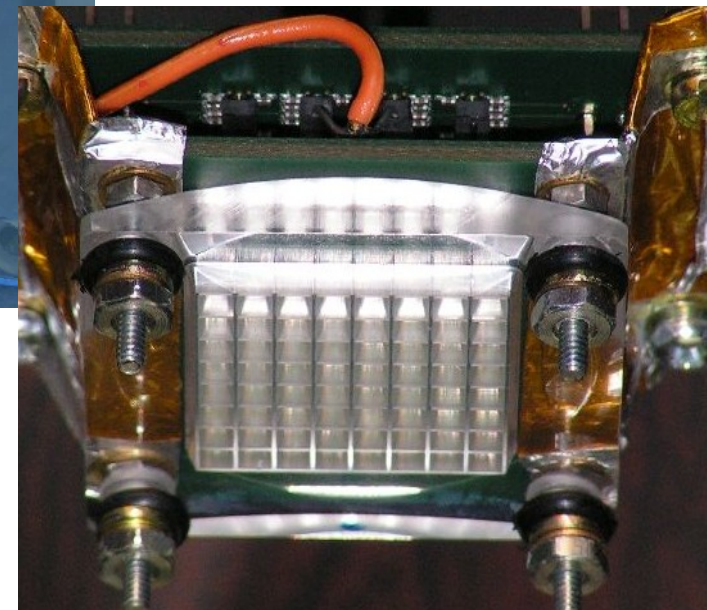
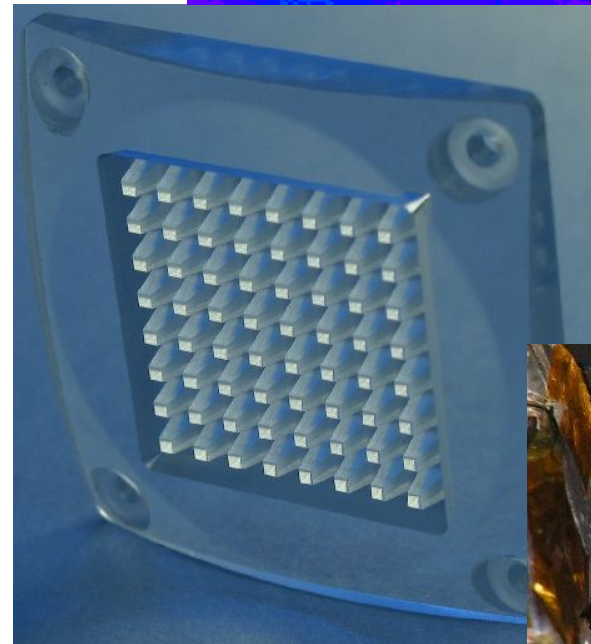
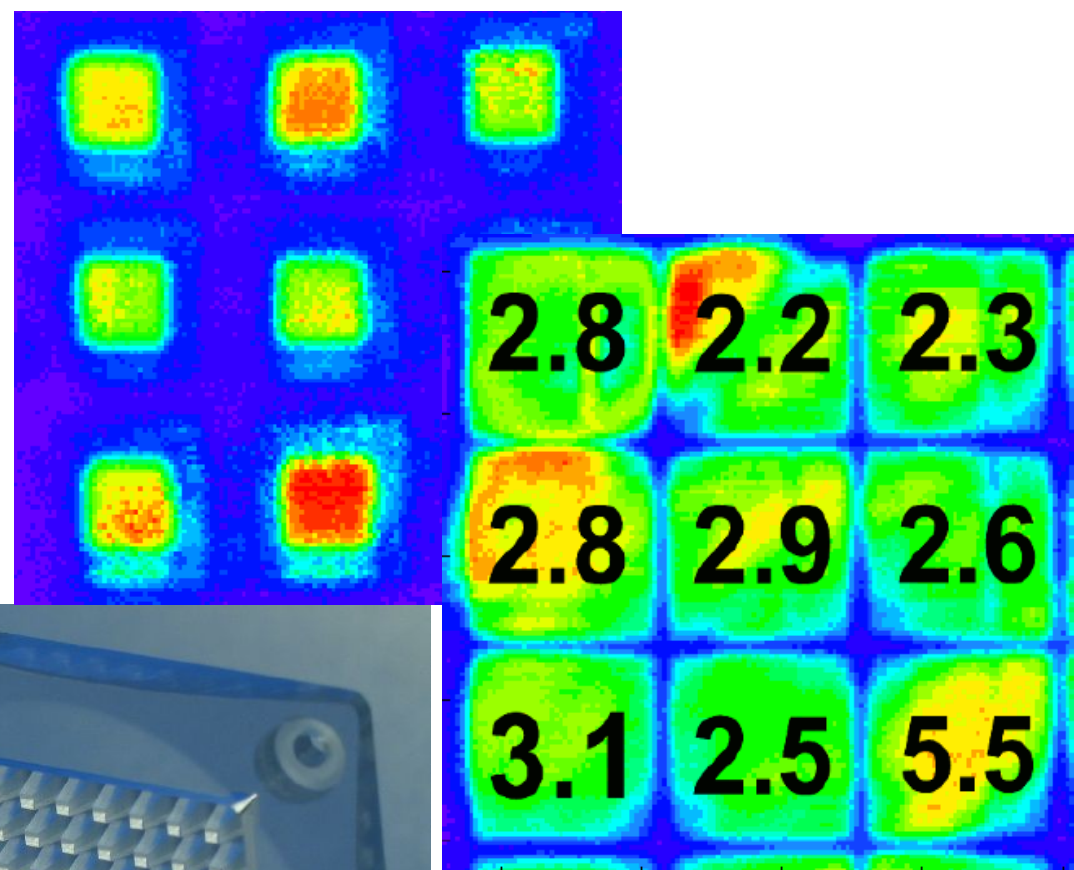
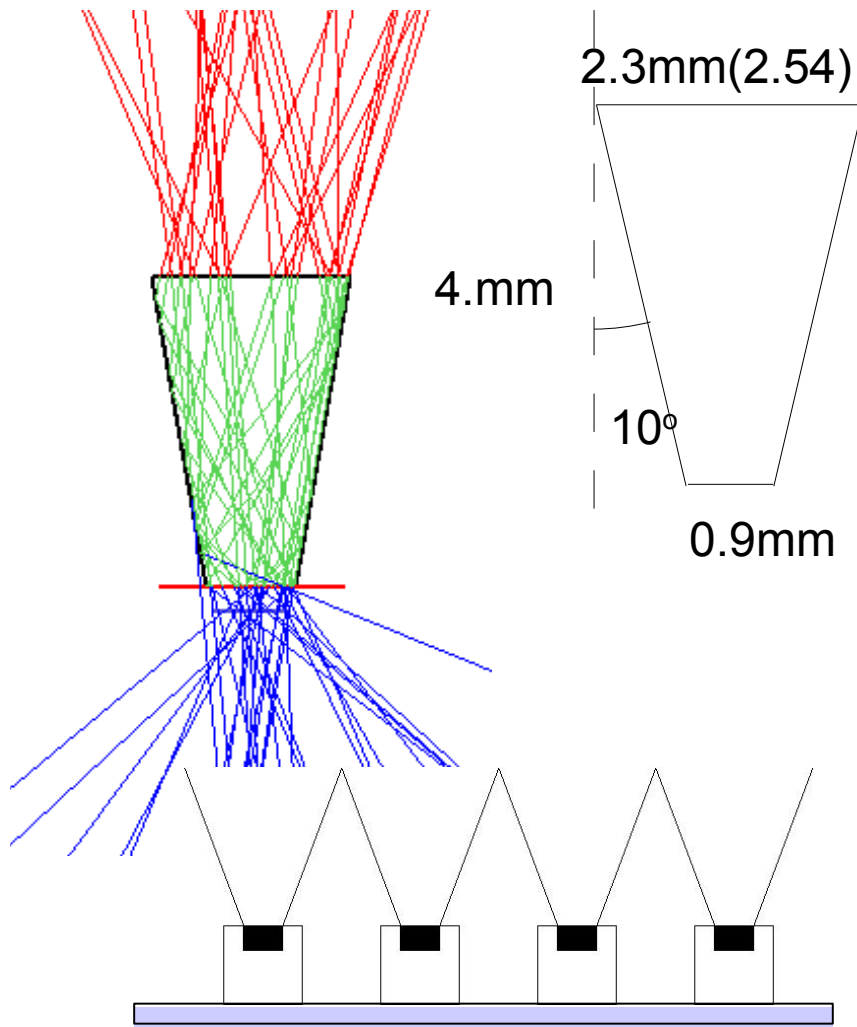
- Plošče s priključki, napajalno napetostjo in delilno uporovno verigo

- In plošče s SiPMi

- 2x2 SiPM združeni v 1 elektronski kanal



# Svetlobni vodniki



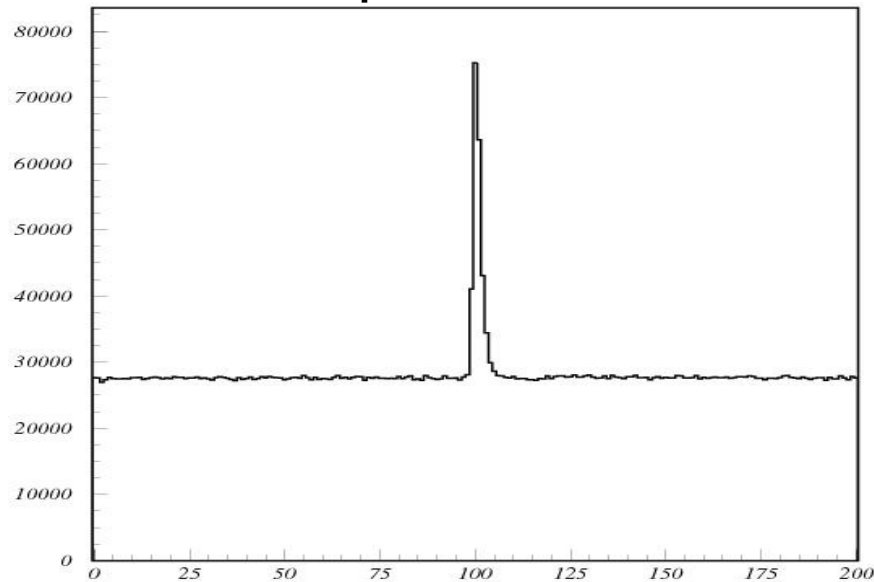
Izrezkani iz leč za HERA-B RICH

- Izkoristek z uporabo vodnikov  $\sim 2.5$   
(razmerje površin  $\sim 5.5$ )

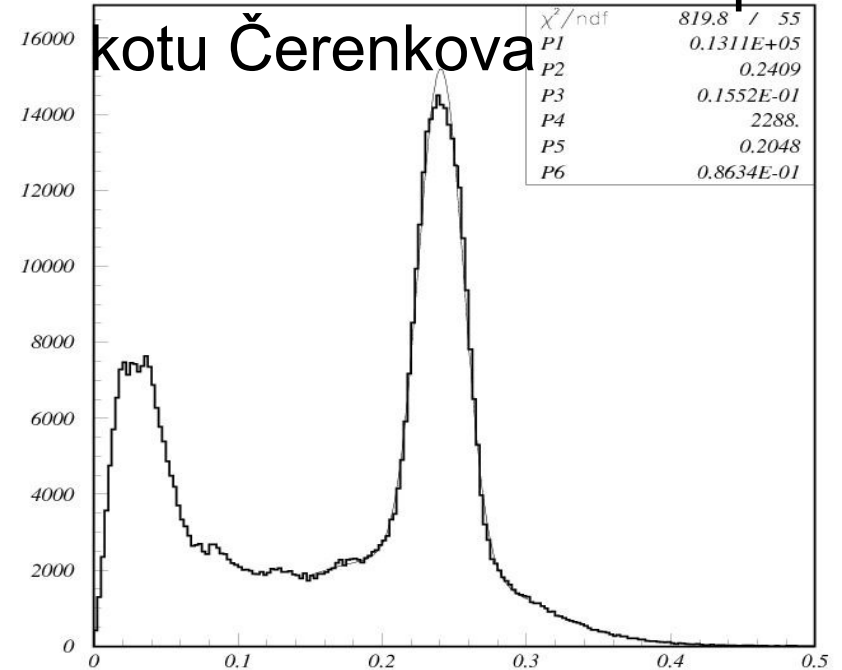


# Silicijeve fotopomnoževalke

## Časovna porazdelitev zadetkov



## Porazdelitev zadetkov po kotu Čerenkova

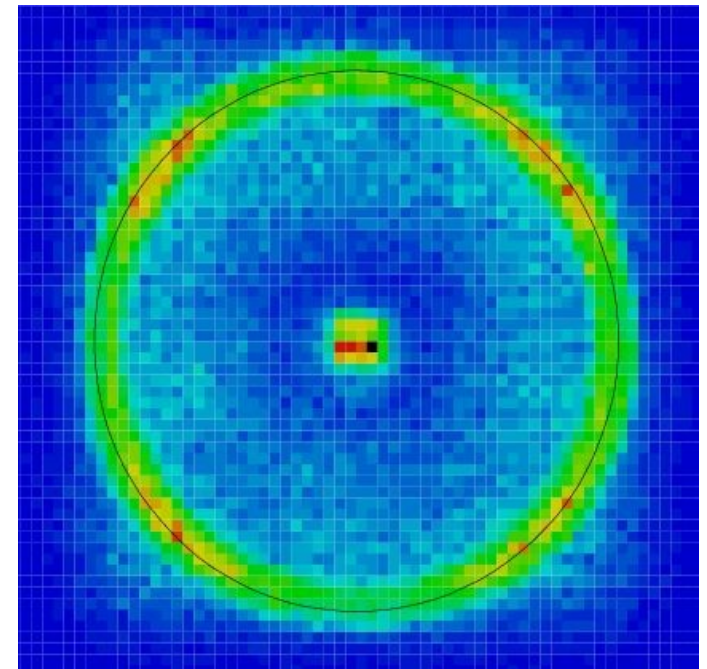


Izmerjene vrednosti za aerogel  
 $d=1\text{cm}$ ,  $n=1.03$ ,  $\text{TRL}@400\text{nm} = 25\text{mm}$

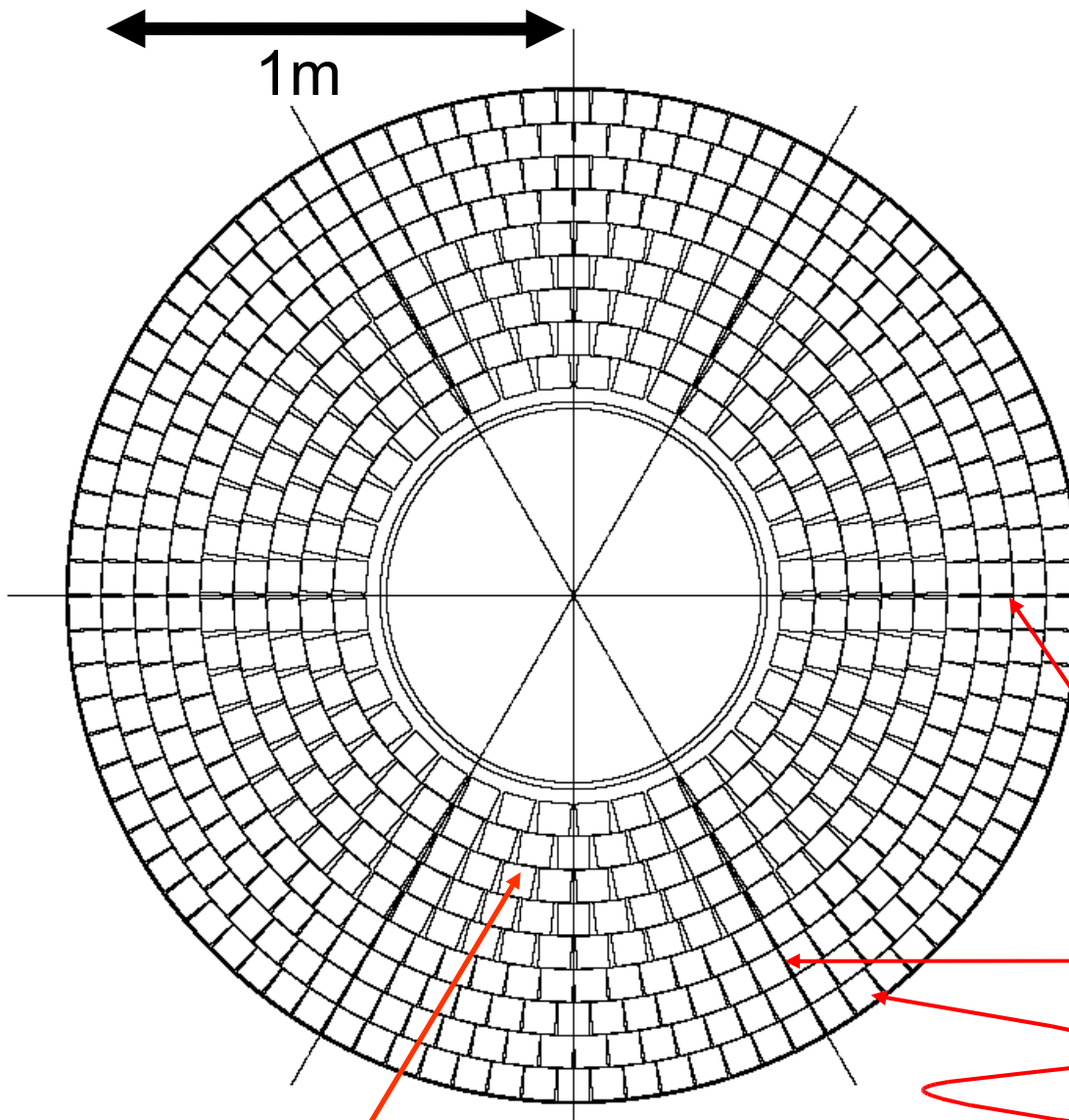
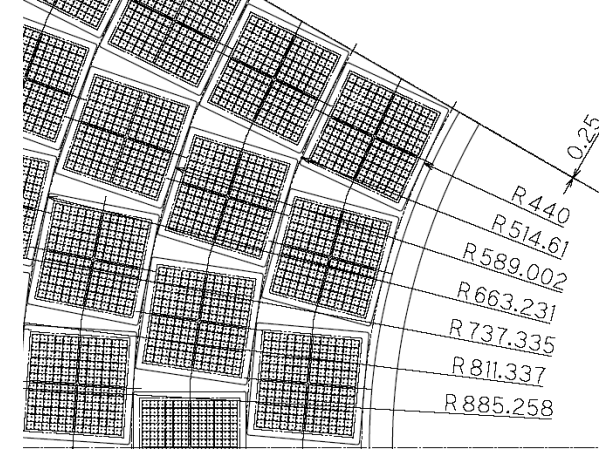
$\sim 3.7 / \text{obroč}$

Ocenjene vrednosti za 4cm aerogela  
 $n=1.05$  in boljši svetlobni vodnik:

$\sim 35 / \text{obroč}$



# Konstrukcija detektorja fotonov



- 92% površine pokrite z HAPD
- Minimalna razdalja med moduli 0.5 mm
- 6 enakih sektorjev

15mm debela notranja stena

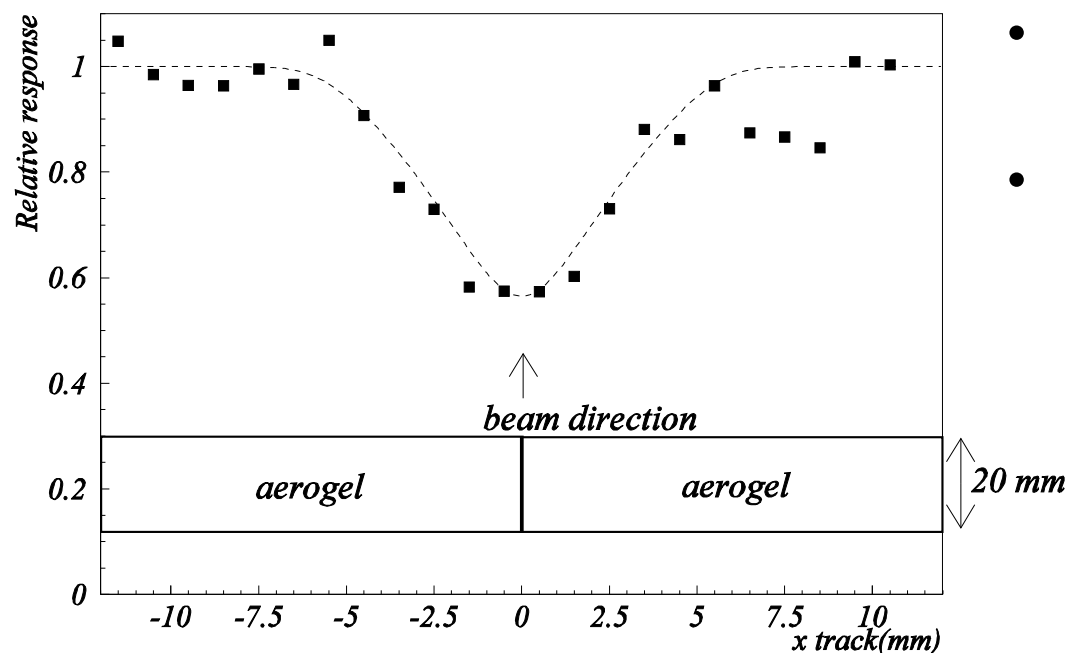
0.5mm debela vmesna stena

10mm debela zunanja stena

# Konstrukcija sevalca I

Fotoni na meji sevalca se izgubijo.

**Sken** z žarkom čez mejo aerogela



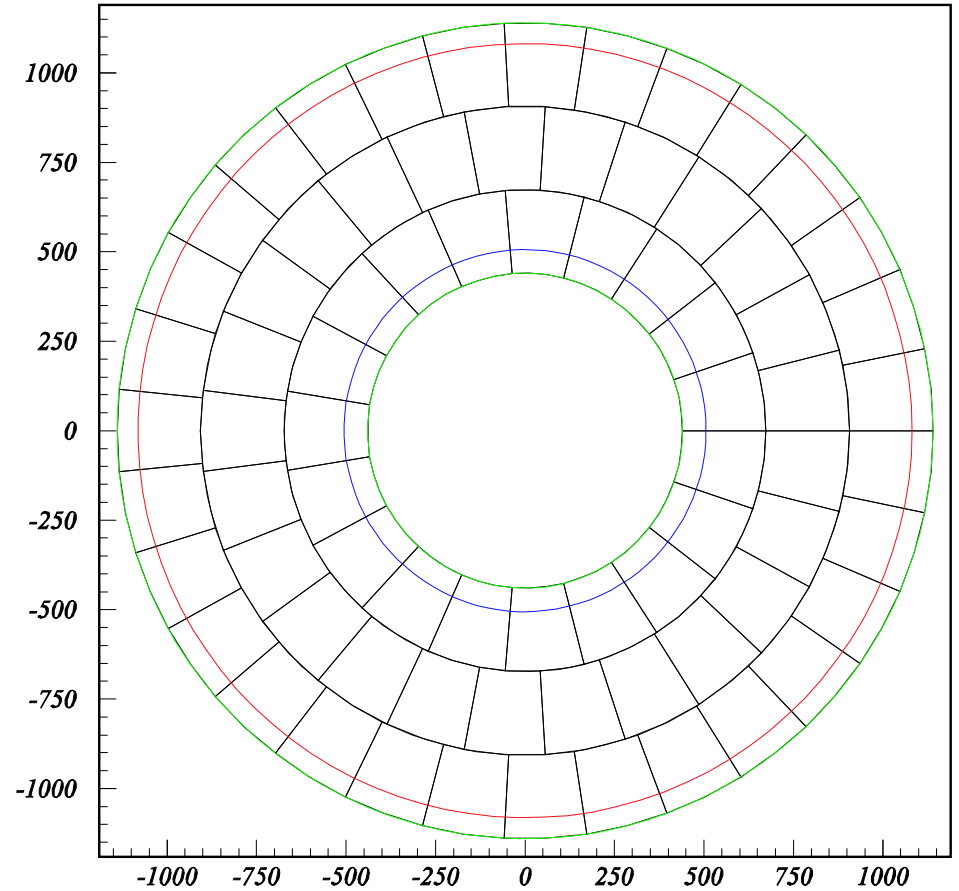
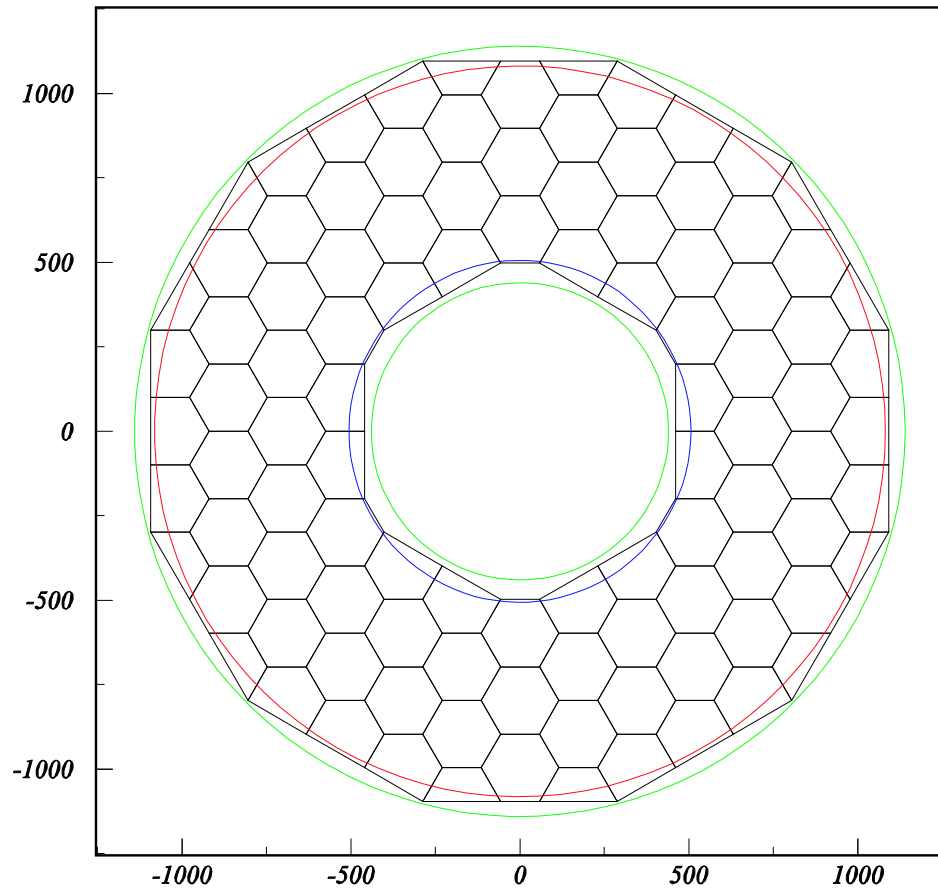
- Po pričakovanjih je prizadet le del nekaj mm ob robu sevalca.
- Podatke dobro opišemo z enostavnim modelom, pri katerem se vsi fotoni, ki zadenejo mejo izgubijo

Zmanjšati delež mej sevalca glede na površino:

- čim večji kosi sevalca
- heksagonalna oblika



# Konstrukcija sevalca II



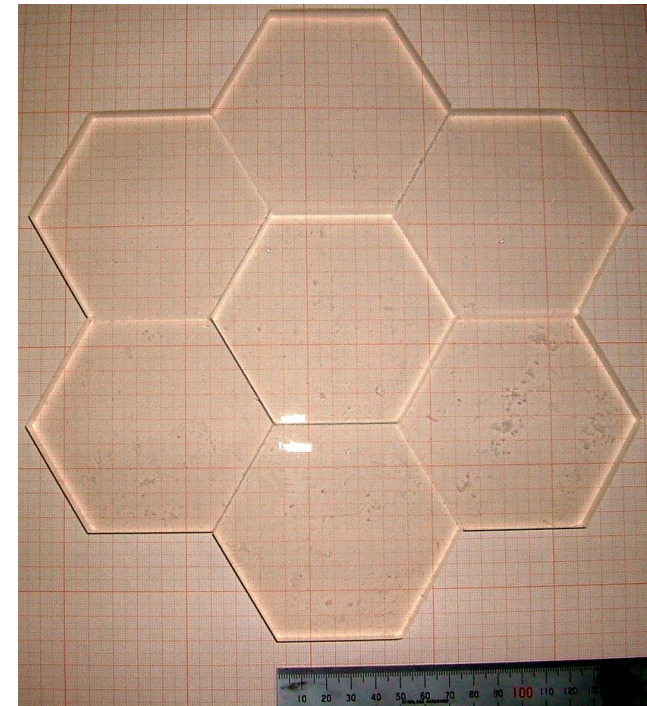
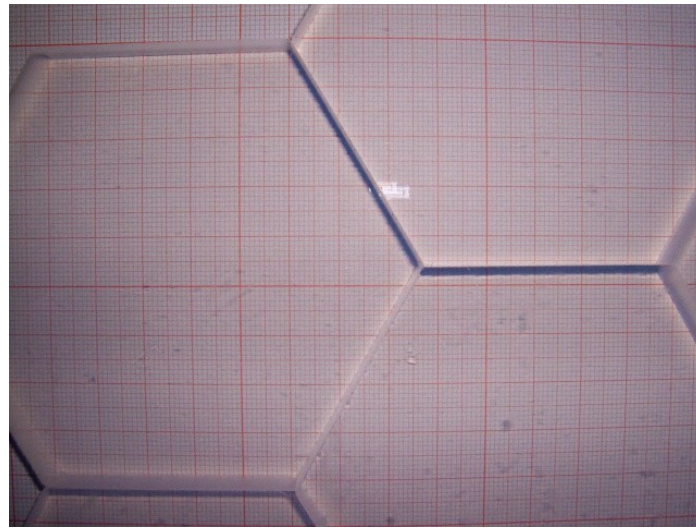
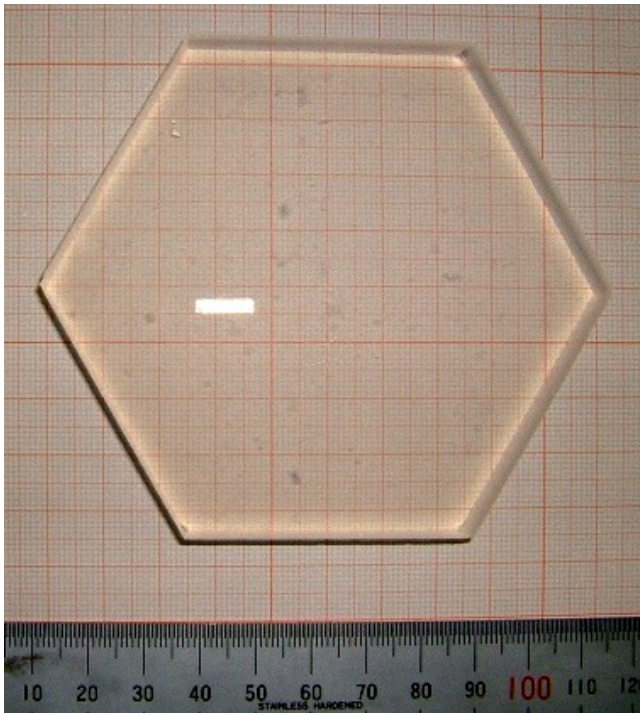
Dve shemi za maksimalen izkoristek



# Heksagonalni kosi aerogela

Izrezani iz kvadratnih blokov z vodni curkom

\* na srečo so hidrofojni



**Izvrstna natančnost izdelave**



# Zaključek

V okviru nadgradnje spektrometra Belle načrtujemo v smeri naprej zamenjavo pragovnega števca Čerenkova z števcem obročev Čerenkova z aerogelom kot sevalcem.

Za učinkovito delovanje detektorskega sklopa bomo kot sevalec uporabili dvoplasten aerogel, pri katerem se obroča Čerenkova za izbrano gibalno količino prekrijeta (zbiralni tip detektorja)

Detektor fotonov mora delovati v magnetnem polju spektrometra 1.5T in in biti sposoben zaznati  $\sim 10$  fotonov na obroč. Preučujemo tri različne variante:

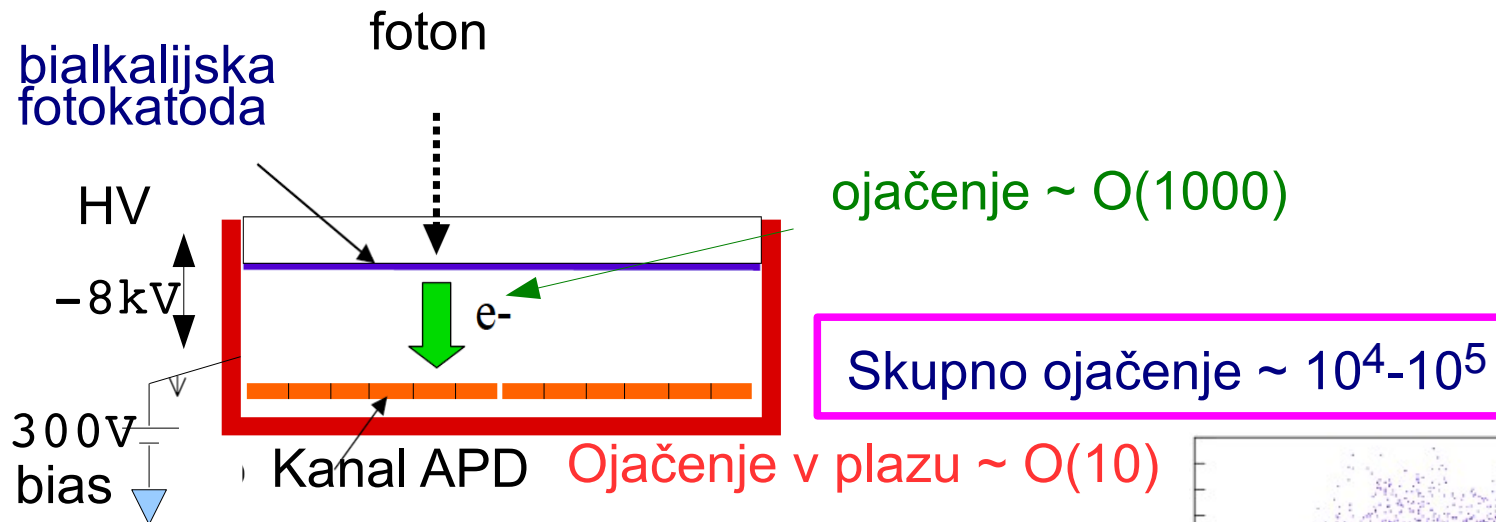
- HAPD , visoka napajalna napetost 8.5kV , potrebujemo posebno nizkošumno čitalno elektroniko, zaznamo 5.7 fot/obroč, problem stabilnost delovanja
- MCP-PMT, zaznamo 8 gruč/ obroč, možen problem radiacijske poškodbe
- SiPM, ki lahko deluje pri nizkih napetostih (10-100V), zaradi male aktivne površine pa za delovanje potrebuje svetlobne vodnike, zaznamo 35 fot./obroč, problem radiacijske poškodbe

## Načrti:

- dokončati testiranje različnih vrst fotonskega detektorja in izbrati ustrezno čitalno elektroniko
- vgraditi detektor Čerenkovih obročev v spektrometer Belle

# Backup slides

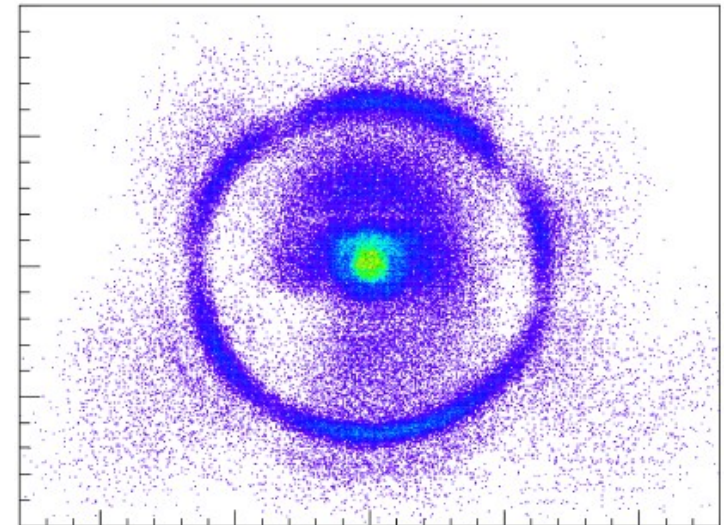
# HAPD



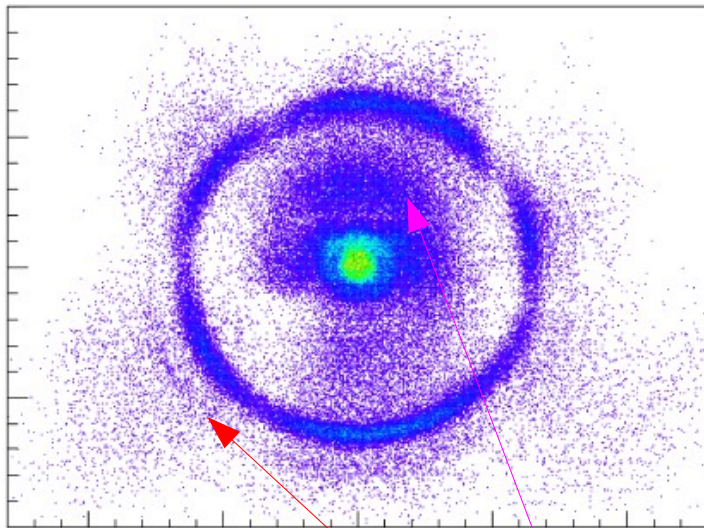
- Razvoj skupaj s firmo Hamamatsu
- **144 kanalov, 4 APD čipi.**
- Fotoobčutljivo območje 64mm×64mm (65%).
- QE  $\sim 22-27\%$  pri vrhu.

Izmerjeno  $N=5.7/$  sled

- Slabši geometrijski izkoristek ( $\sim 0.6$ )
- Problemi s stabilnostjo delovanja

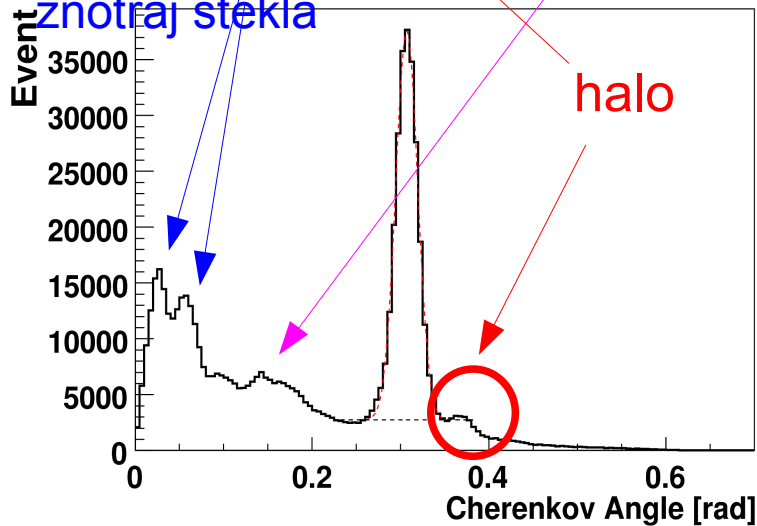


# HAPD - Ozadje v porazdelitvi

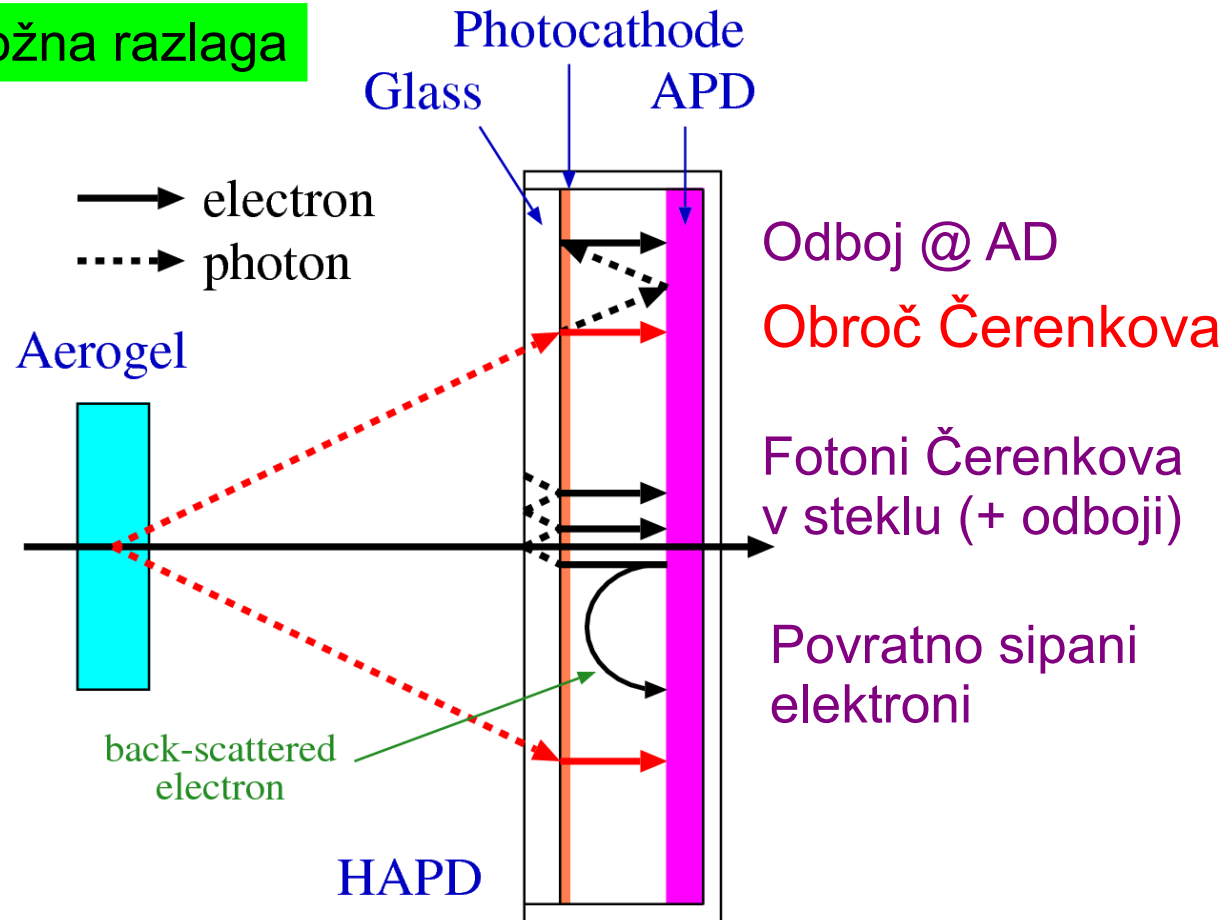


Odboj fotonov Čerenkova znotraj stekla

Dodatna struktura



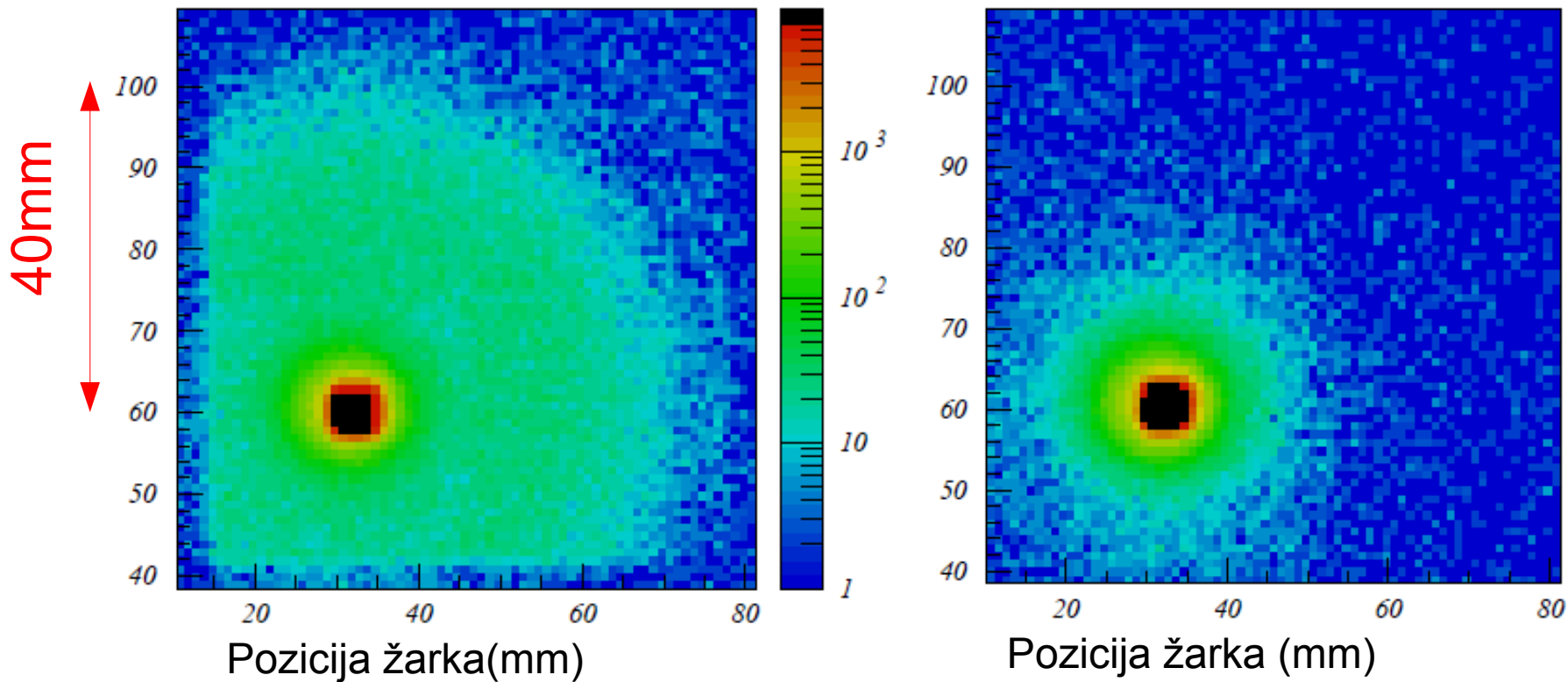
Možna razlaga



# Testi HAPD v mag. polju

0T

1.5T

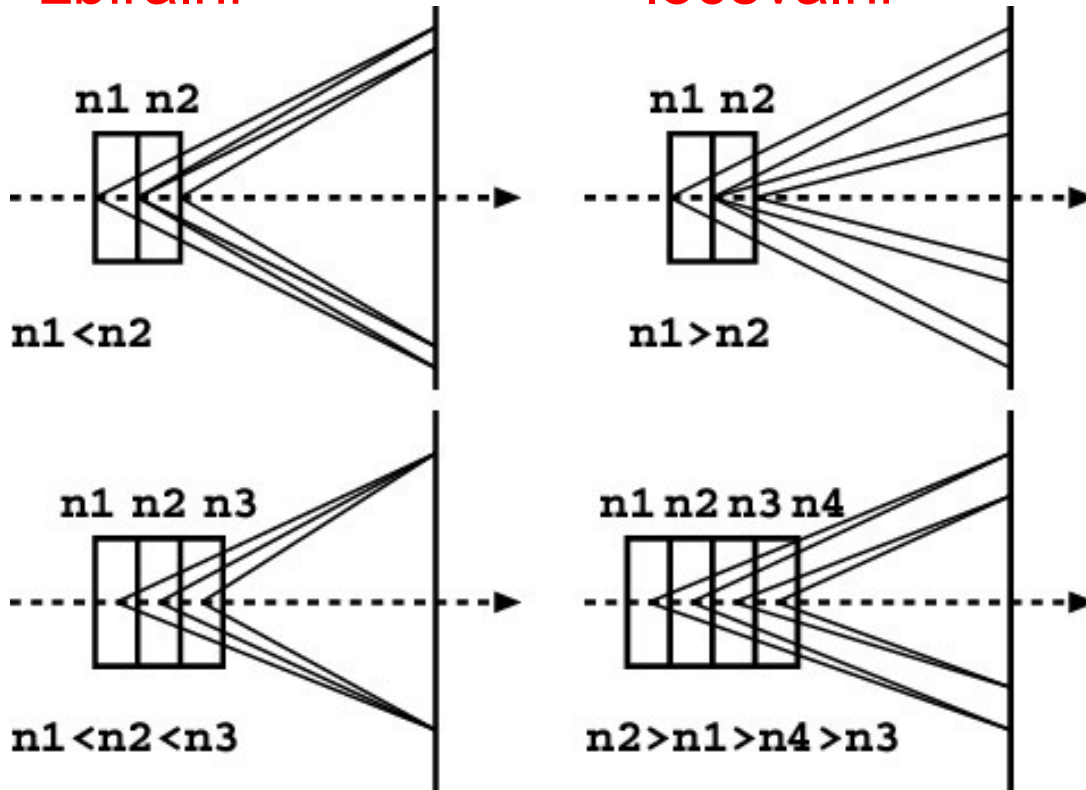


- Odziv enega kanala HAPD glede na pozicijo žarka
- Doseg povratnega sipanja
- maximum ~40mm @ 0T in ~0.2mm @ 1.5T
- Effect povratnega sipanja elektronov se v magnetnem polju bistveno zmanjša

# Možne razširitve

zbiralni

ločevalni



zbiralni

Zbiralno ločevalni

2 (ali več) plasti z različnim  $n$

– zlepljenih na molekularnem nivoju

– rokovanje enostavno

– neobčutljivo na morebitne površinske efekte

$n=1.045$

$n=1.05$

$n=1.055$

