

Polprevodniški detektorji za bodoče trkalnike

Igor Mandić

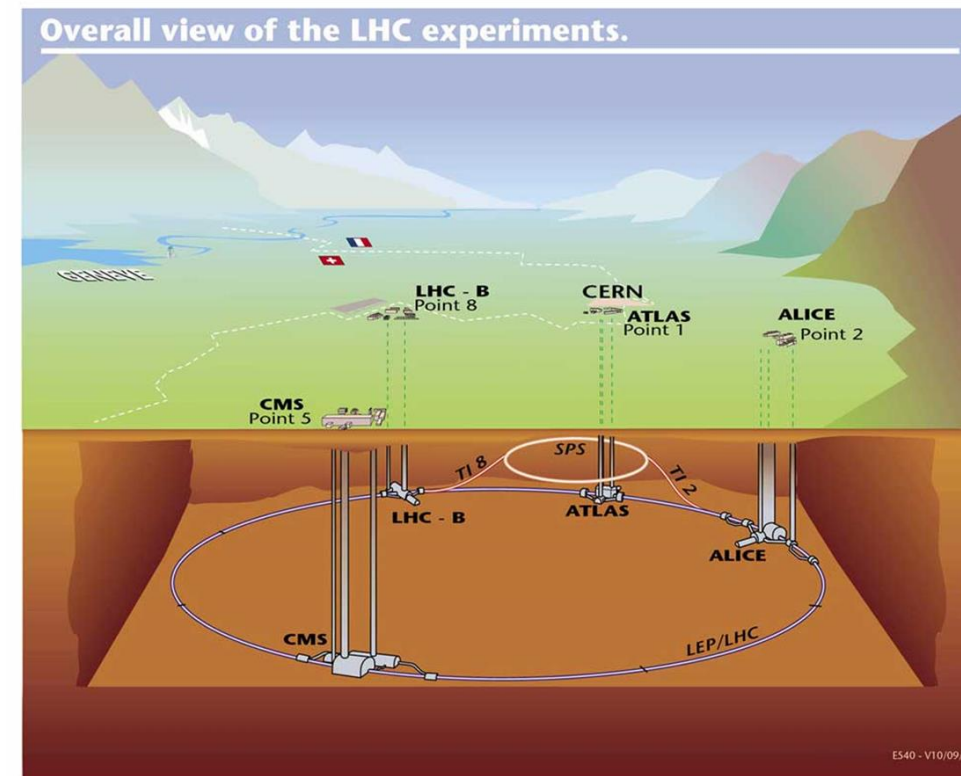
Odsek za eksperimentalno fiziko osnovnih delcev F9

Vsebina

- Uvod
- Osnovni principi delovanja polprevodniških detektorjev za nabite delce
- Detektorji za sledenje nabitih delcev v fiziki delcev
- Detektorji za bodoči trkalnik HL-LHC
- Smeri razvoja detektorjev za bolj oddaljeno prihodnost

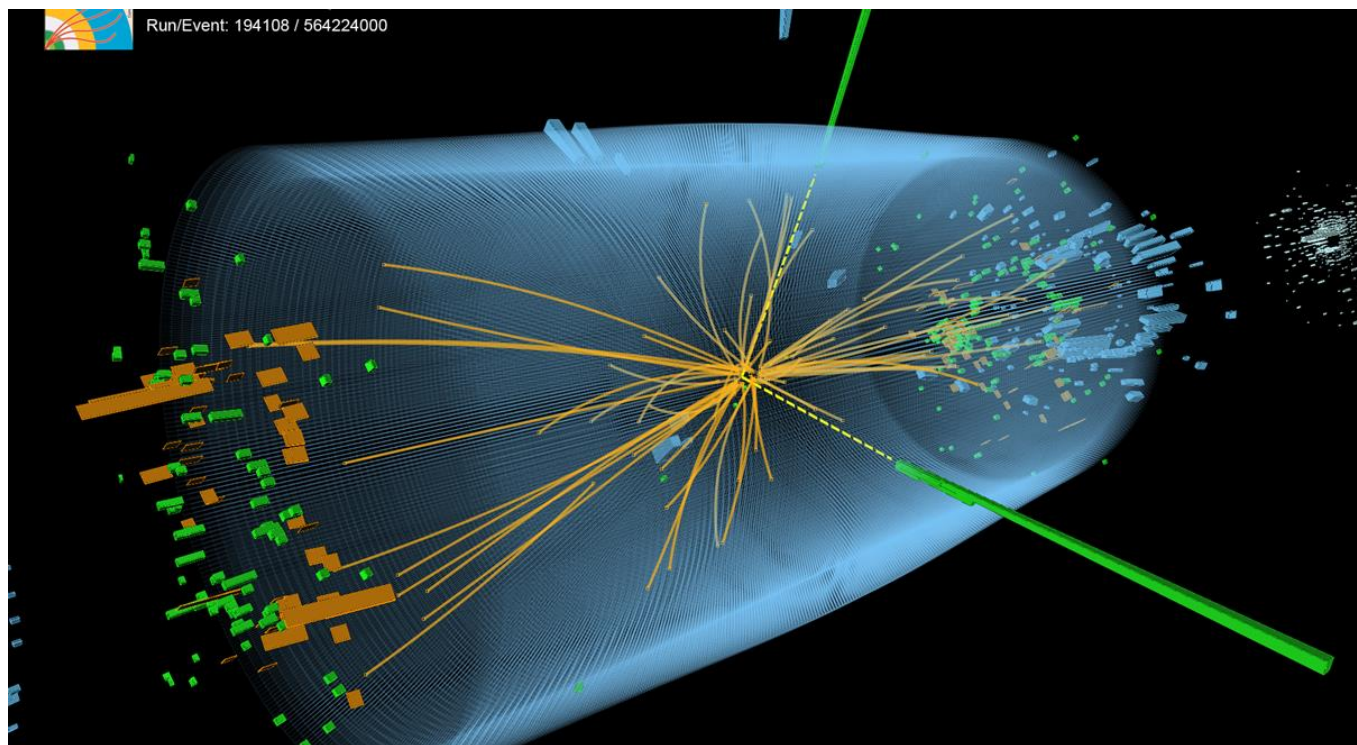
Ekspirimenti v fiziki osnovnih delcev

- **trki delcev, ki jih v pospeševalnikih pospešimo do visokih energij**
 - **primer: Large Hadron Collider (LHC) v CERNu**
 - tunel ~ 100 m pod površjem, obseg 27 km, premer cevi ~ 4 m
 - v obeh smereh krožijo po vakuumskih ceveh protoni z energijo **6.8 TeV**
 - na nekaterih mestih trki protonov \rightarrow tam so eksperimentalne naprave
 - skupina z F9 sodeluje pri eksperimentu **ATLAS**



Eksperimenti v fiziki osnovnih delcev

- trki protonov z energijo **6.8 TeV** (mirovna energija protona $E = mc^2 \sim 0.001 \text{ TeV}$)
- ob trkih protonov nastanejo različni delci (npr. **Higgsov bozon**, razpade že $\sim 10^{-22} \text{ s}$ po nastanku)
- nestabilni delci razpadejo v bolj stabilne delce, ki odletijo skozi detektorje postavljene okrog interakcijske točke
- zaznamo **sledi nabitih delcev**, ki preletijo detektorje
- v kalorimetrih zaznamo fotone
 - ➔ rekonstruiramo proces, ki se je zgodil pri trku

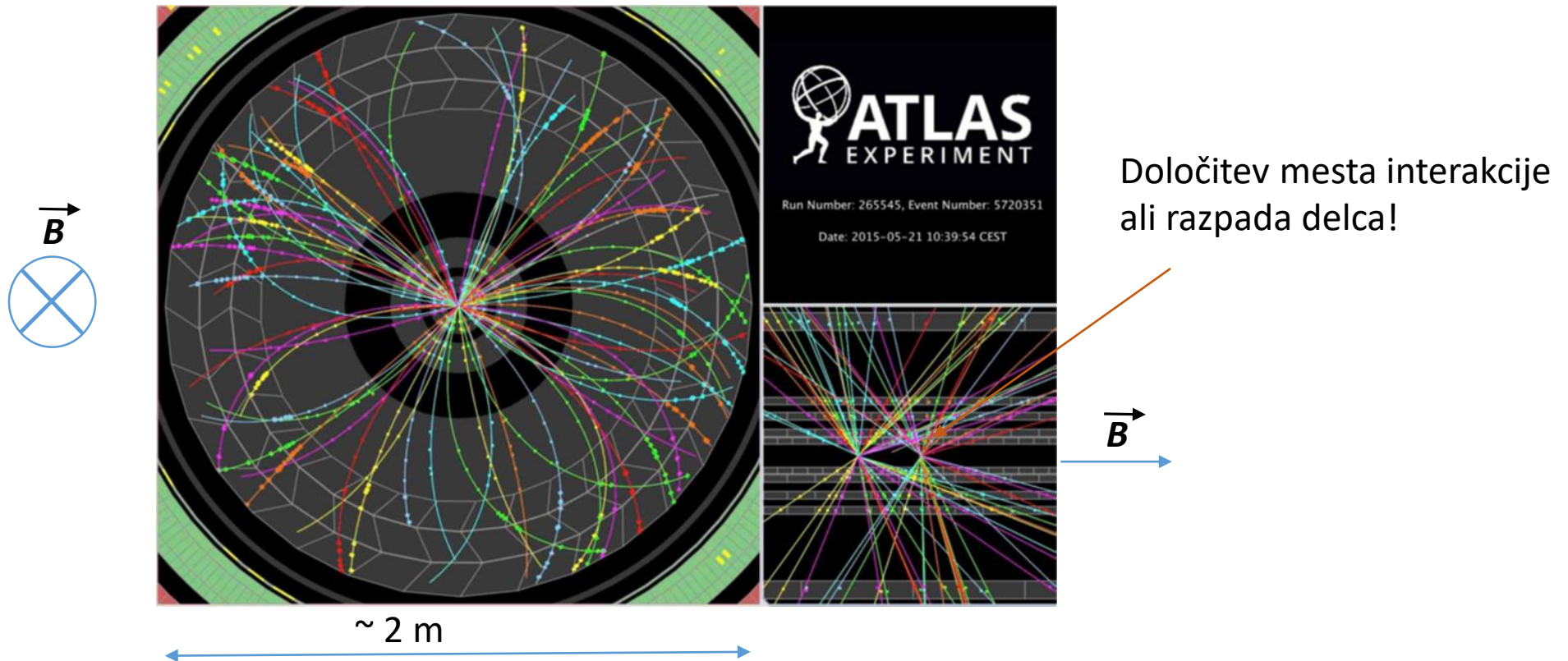


Rekonstrukcija sledi nabitih delcev

- najbližje mestu interakcije postavimo detektorje za sledenje nabitih delcev
→ visoke energije nabitih delcev, v detektorjih malo mase → **ne zmotijo znatno tira nabitega delca**
- ustvarimo homogeno magnetno polje (ATLAS $B = 2T$)

→ tir nabitega delca v magnetnem polju B ukrivljen:

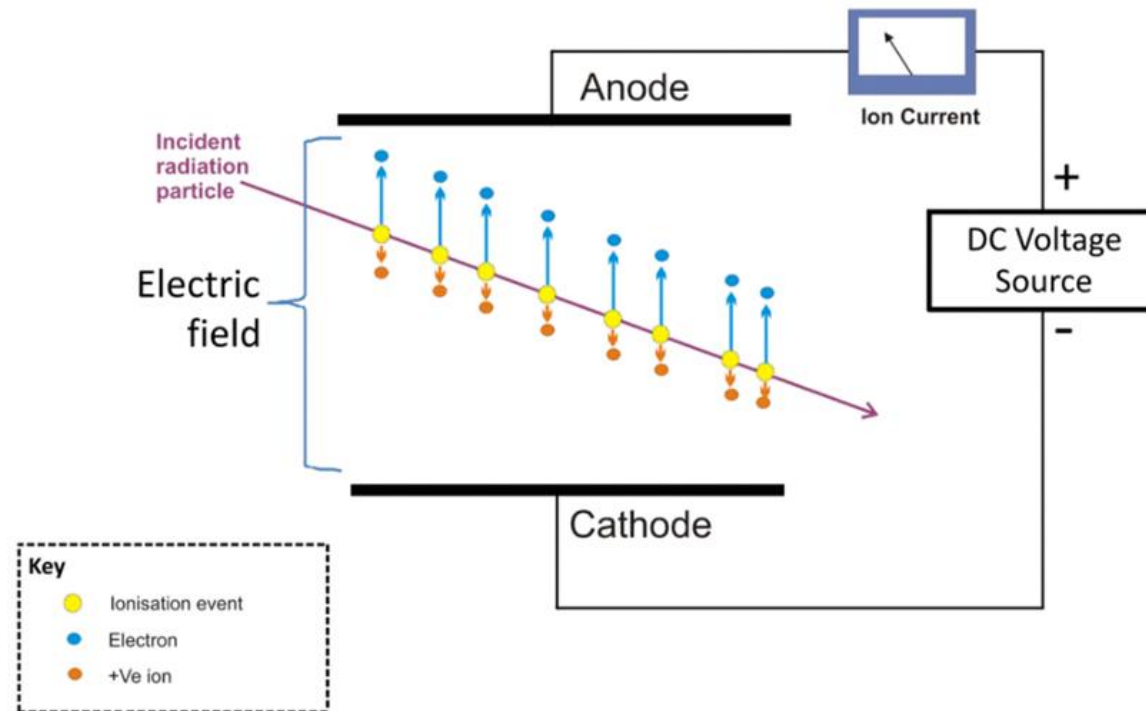
če \vec{p} in \vec{B} pravokotna: $p = e \cdot r \cdot B$ → **radij tira r** → **gibalna količina delca p**
→ **smer krivljenja** → **predznak naboja e**



Zaznavanje nabitih delcev

- nabiti delec ionizira snov skozi katero se giblje

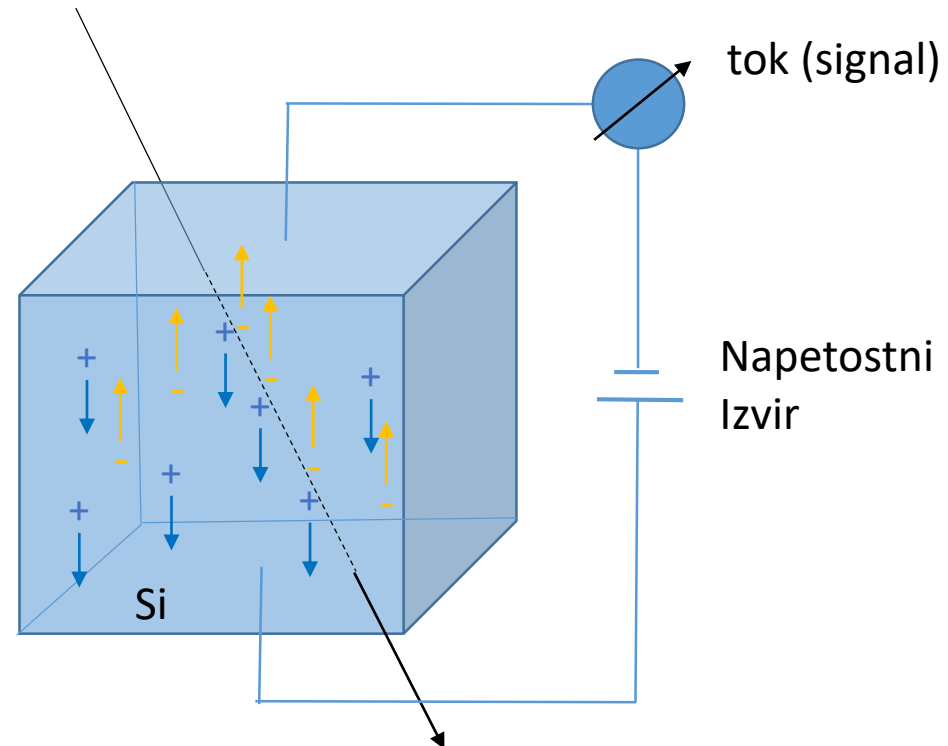
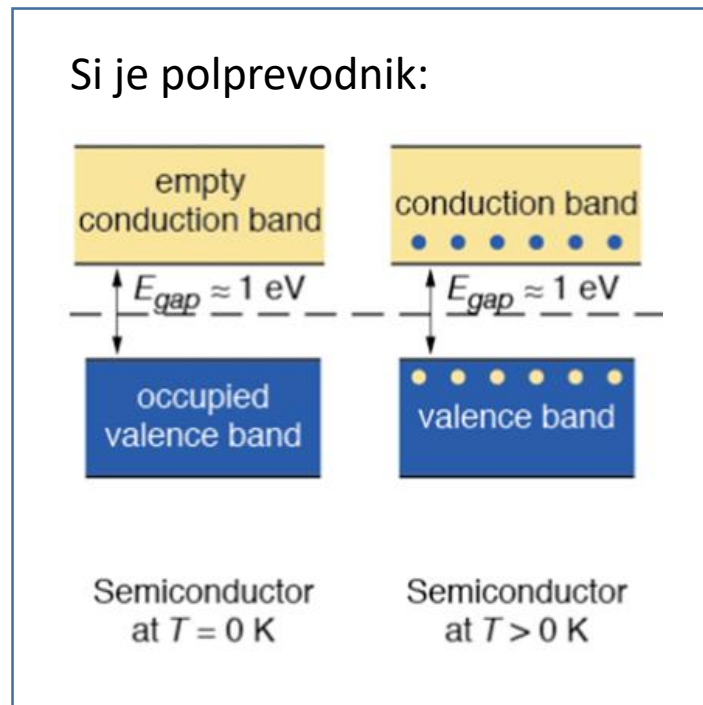
- v snovi – npr. plin ali **polprevodnik (Si)** .. - ustvarimo električno polje, ki povzroči premikanje sproščene naboja
→ premikanje naboja influencira tok v bližnjih elektrodah → signal



Silicijev detektor

- v detektorski snovi **ne sme biti (veliko) prostih nosilcev naboja**
- nosilci naboja , ki jih sprosti nabiti delec pa morajo biti **gibljivi**
→ polprevodnik (Si), vendar: **v čistem Si je prostih nosilcev preveč**

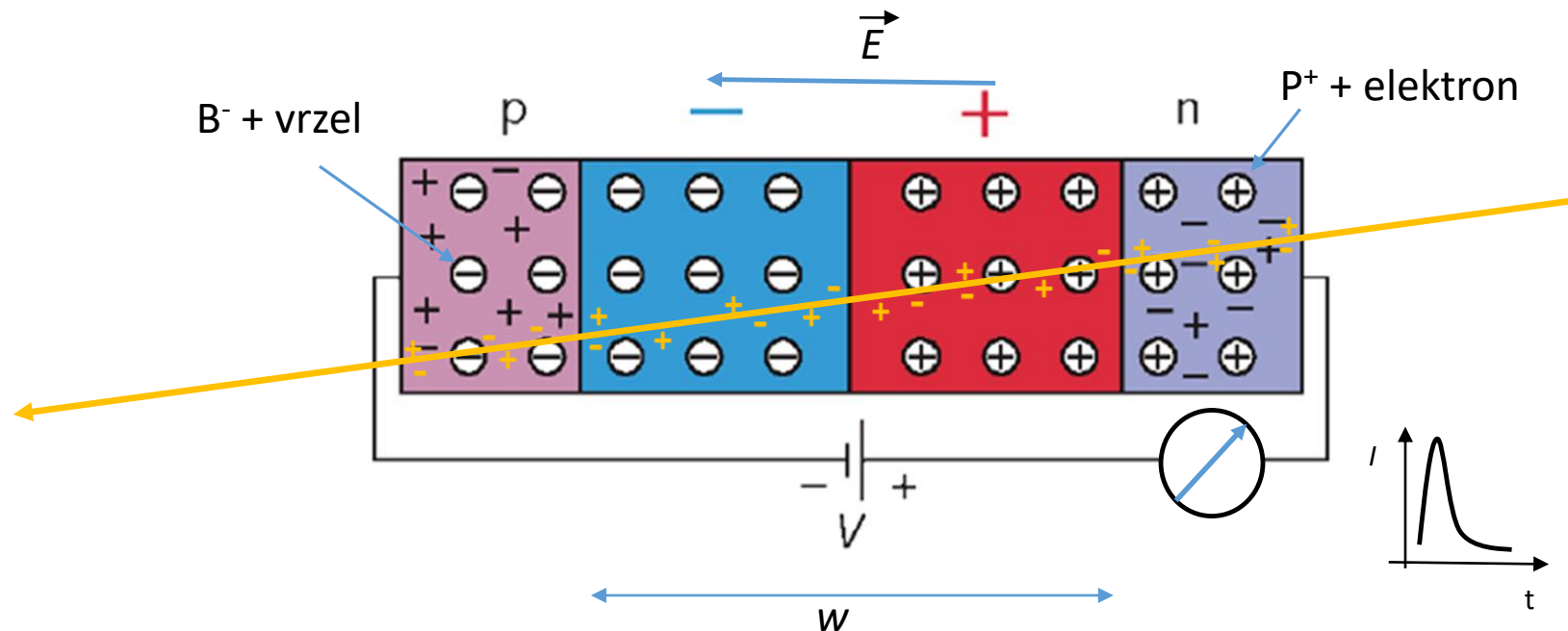
→ za zaznavanje prehoda nabitega delca uporabimo P-N stik



P-N stik

- v Si dodamo primesi, npr.: bor B (**p**-tip) in fosfor P (**n**-tip)
- na prehodu med **p** področjem in **n** področjem nastane osiromašena plast:
 - **ni prostih nosilcev**, samo **prostorski naboj** (negibljive ionizirane primesi)
 - **električno polje**
- P-N stik (dioda) priključimo na napetost v zaporni smeri in povečamo osiromašeno področje
→ širina osiromašenega področja odvisna od gostote prostorskega naboja $w \sim \sqrt{(\rho \cdot V)}$
(ρ specifična upornost)

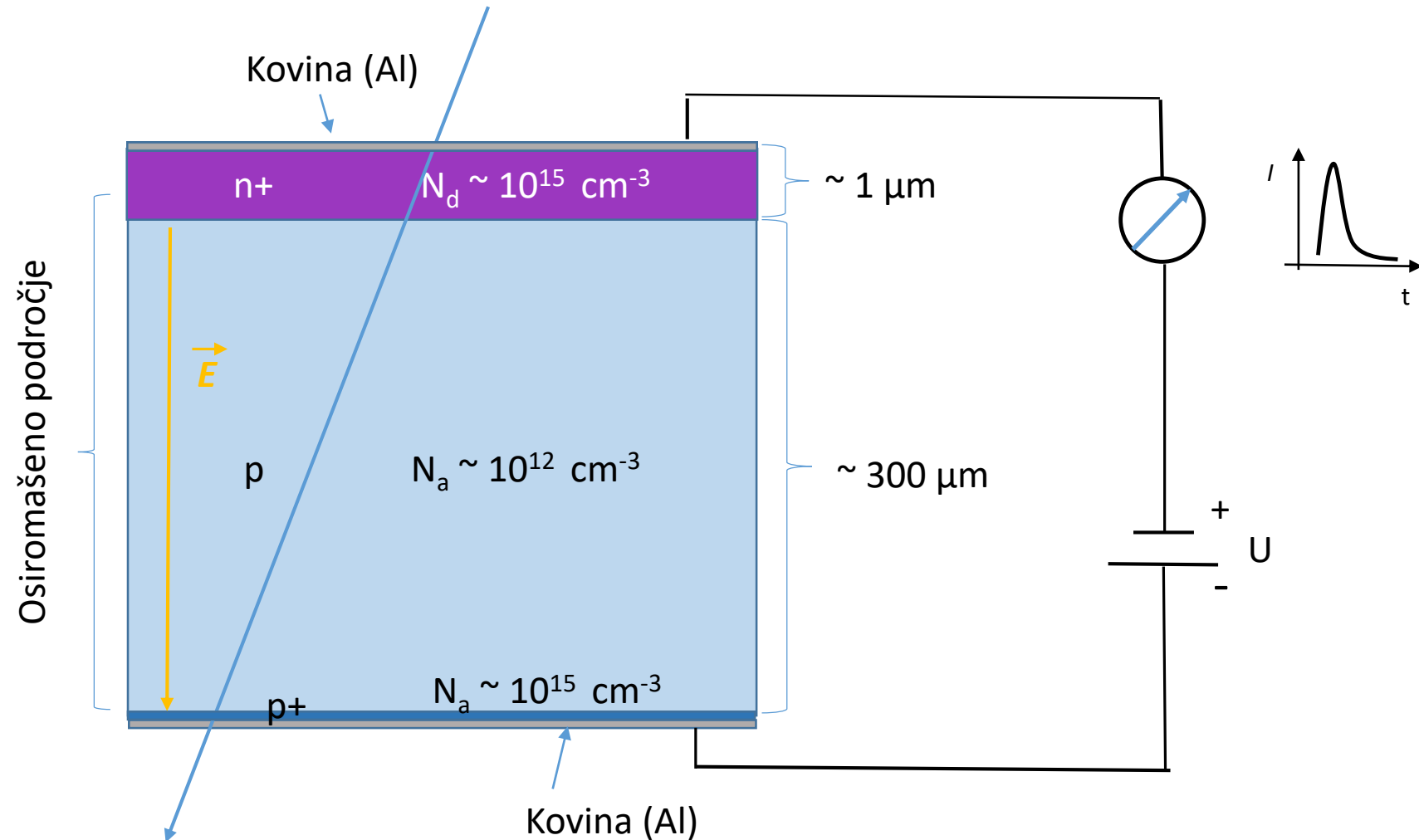
→ silicijevi detektorji za nabite delce so diode priključene v zaporni smeri



P-N stik

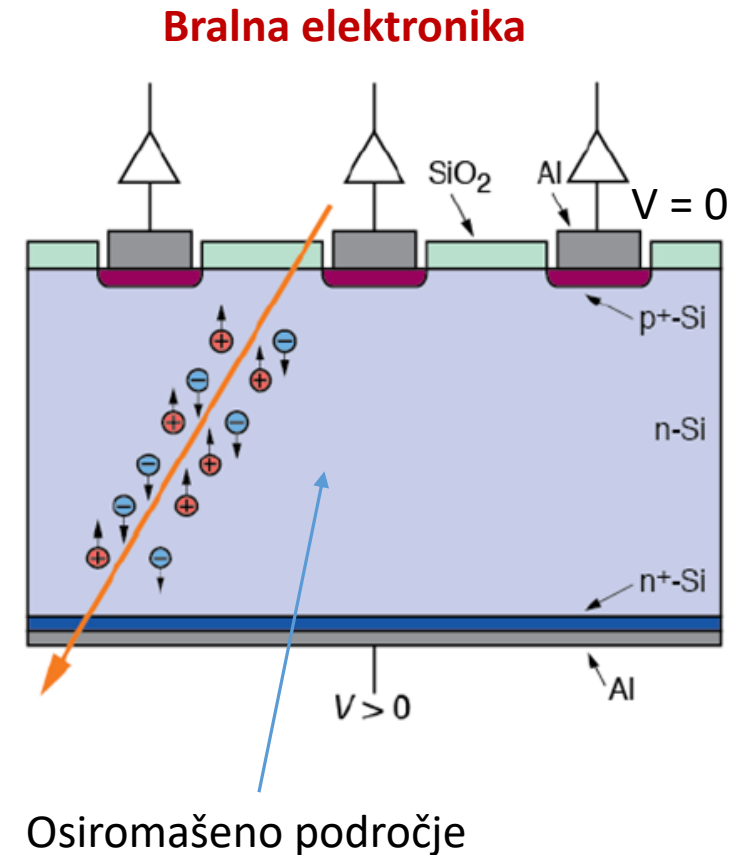
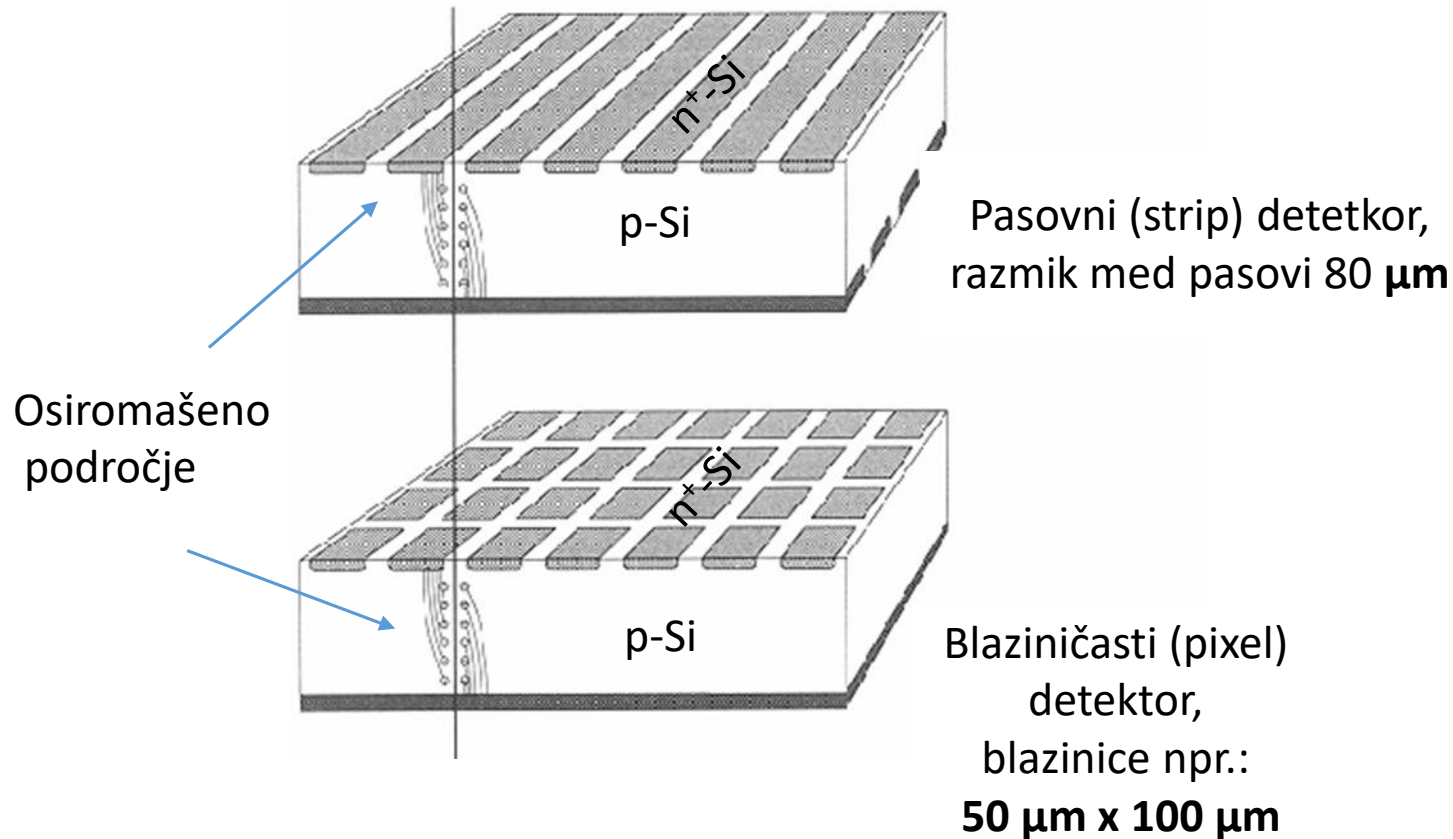
Detektor:

- tanka plast silicija z veliko primesmi na substratu z malo primesmi (nizko dopirani)
→ nizko dopirani del osiromašimo



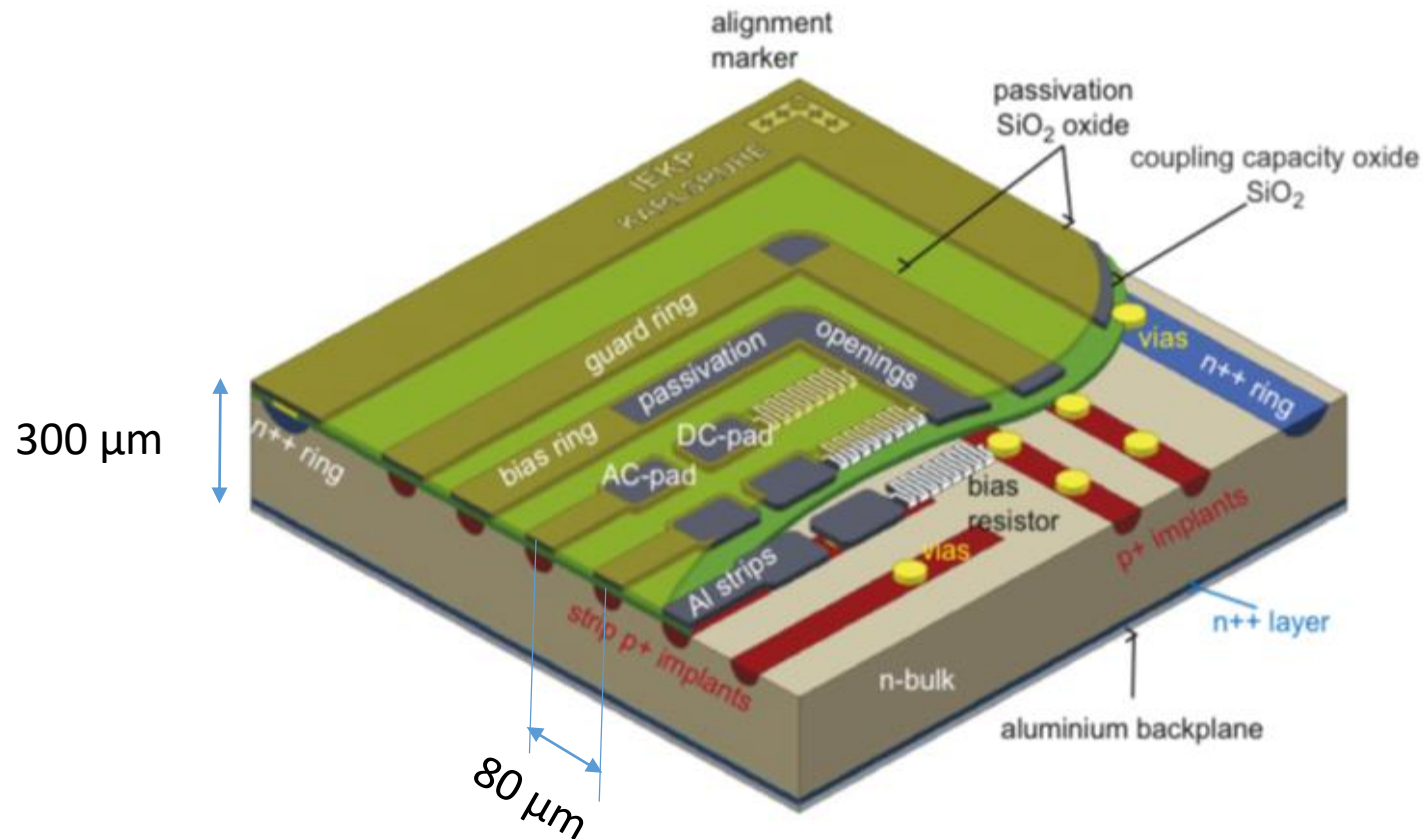
Segmentacija

- močno dopirano plast segmentiramo
- segmente priključimo na bralna elektroniko
- signal iz segmenta da informacijo o mestu preleta nabitega delca



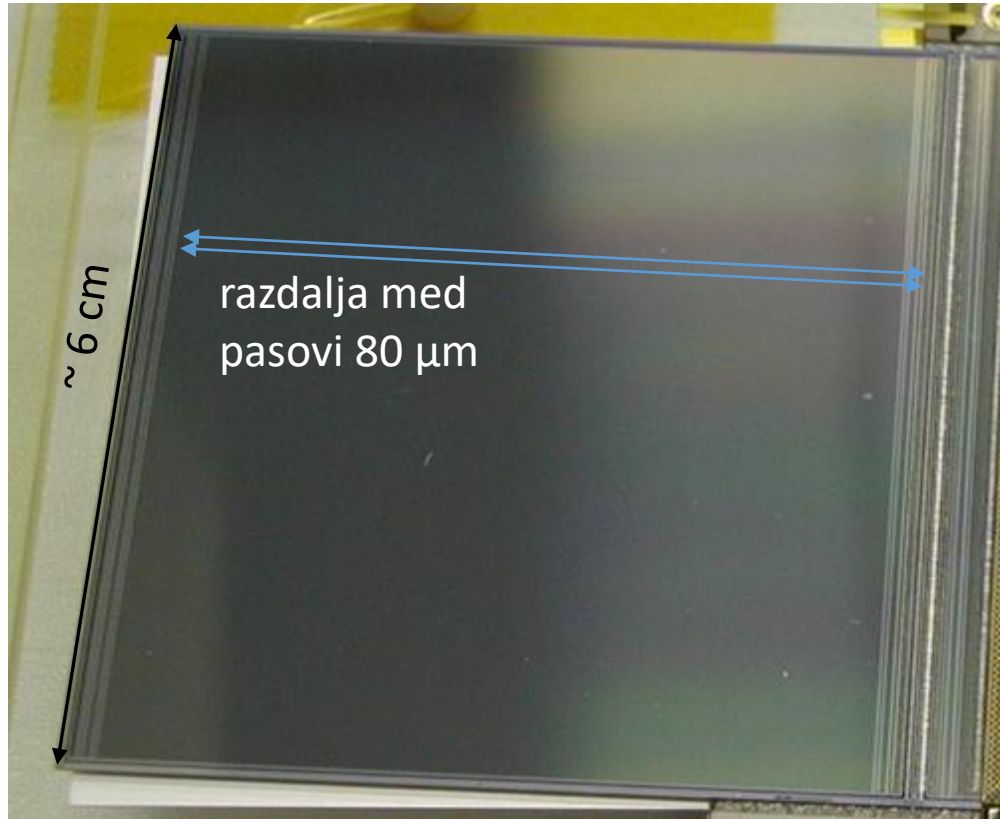
Si detektor

- tehnologija izdelave enaka kot pri izdelavi integriranih elektronskih vezij ("čipov")
 - fotolitografija
 - implantacija primesi (fosfor P (n-tip) ali bor B (p-tip))
- ➔ detektor je razmeroma enostavno integrirano vezje z nekaj posebnosti:
 - izdelano na siliciju z malo primesmi, da ga lahko osiromašimo
 - strukture so narejene tako, da lahko priključimo **visoke napetosti – več 100 V – in ne pride do prebojev**
 - ➔ izdelujejo jih samo v specializiranih obratih

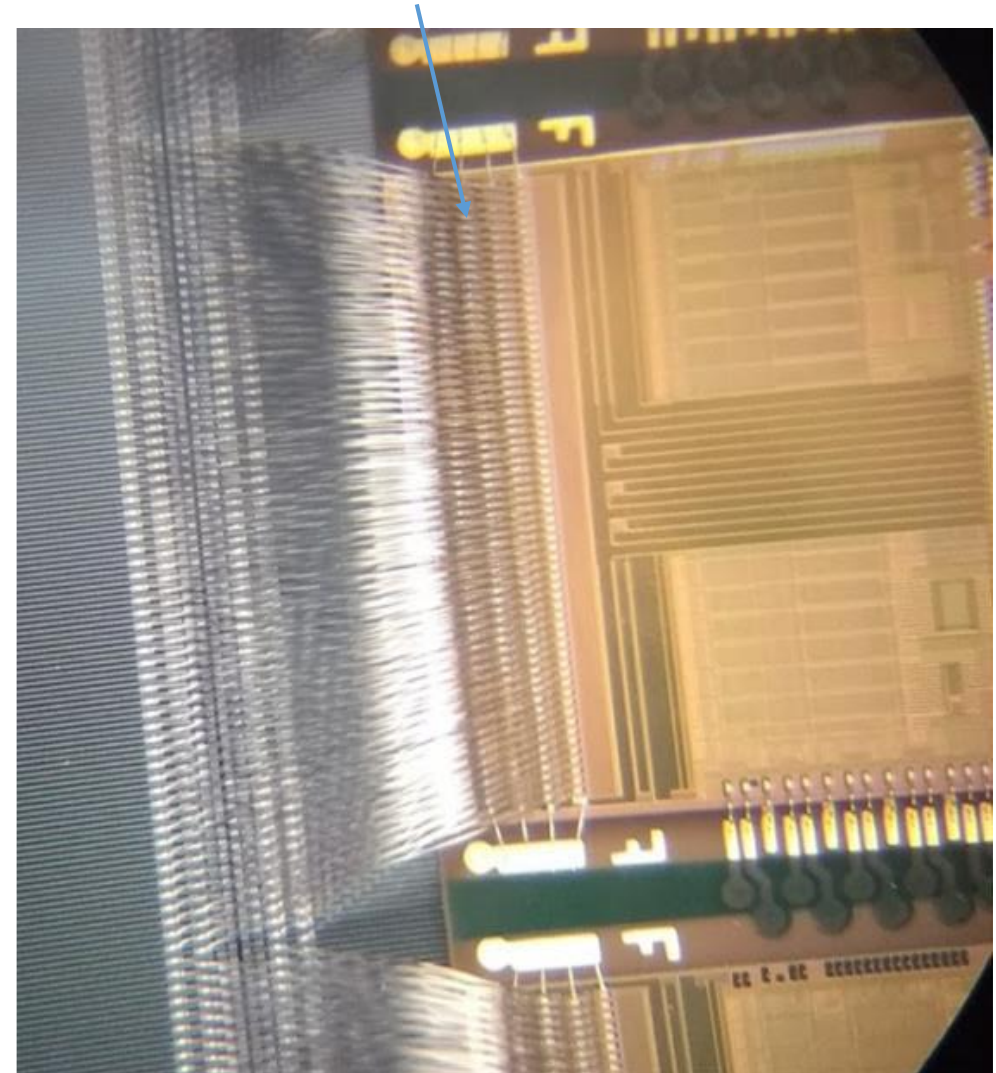


Detektorji

- pasovni detektor

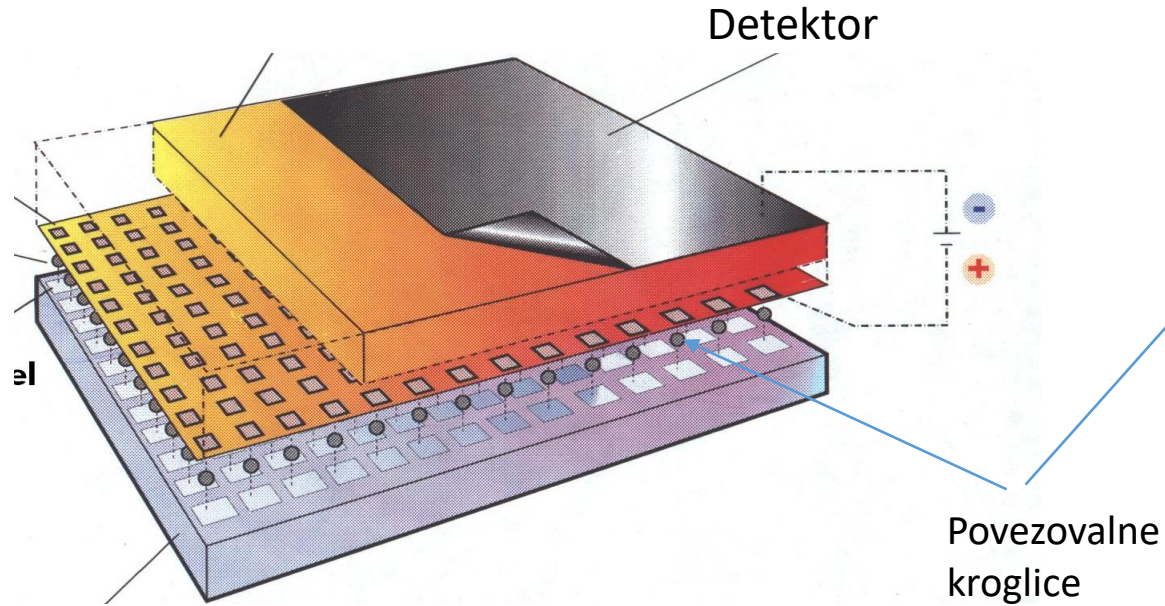


- vsak pas povezan s svojim bralnim kanalom na bralnem čipu z Al žičko debeline 25 μm



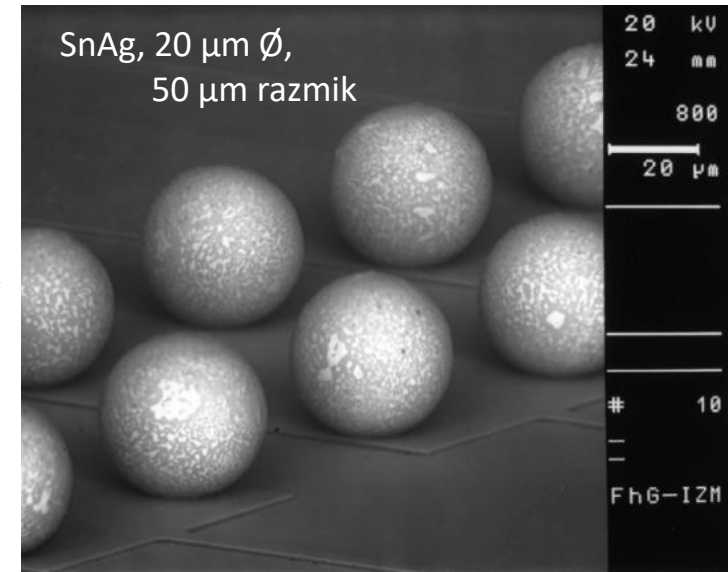
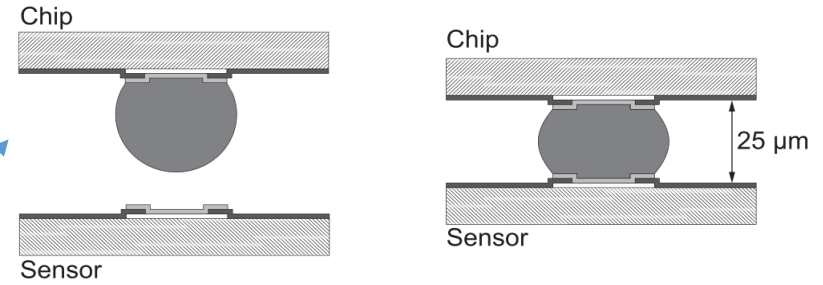
Detektorji

- blaziničasti detektor



Bralni čip

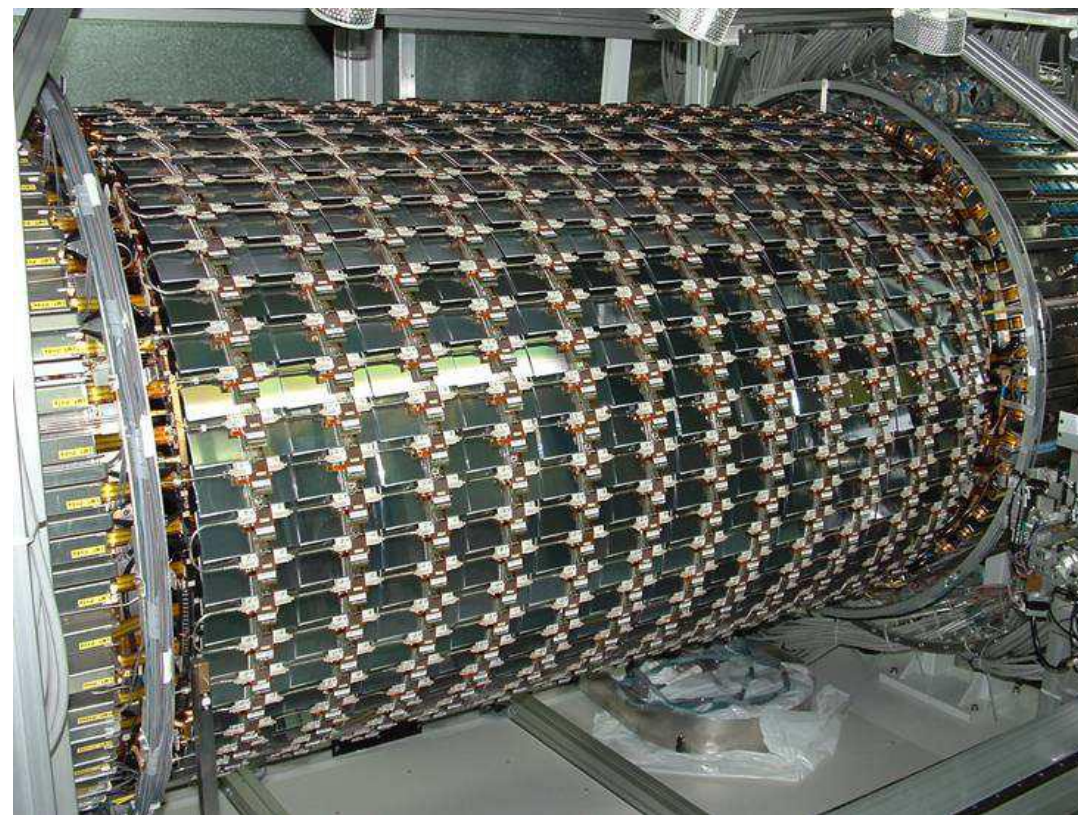
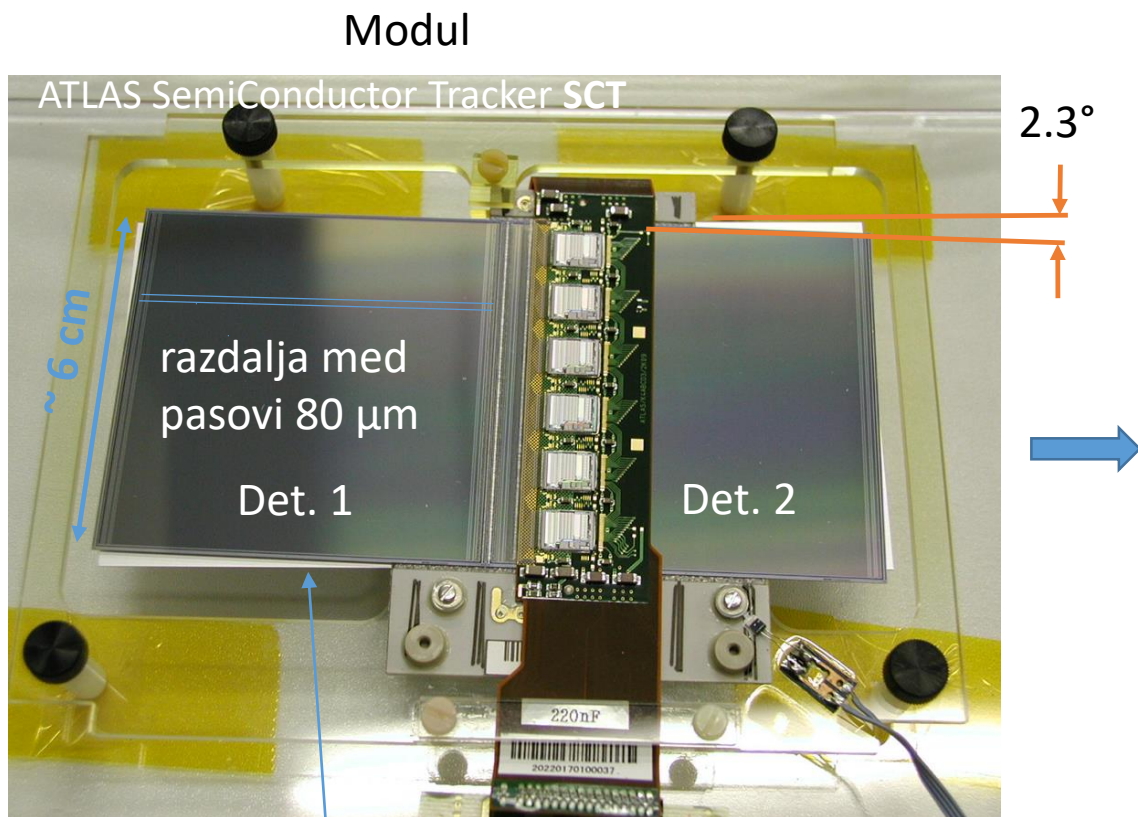
- vsaka blazinica na detektorju svoj ojačevalec na bralnem čipu



Detektorski sistemi

- iz detektorjev in elektronskih komponent sestavimo **module** in jih zložimo v sistem:
 - pasovni detektor v eksperimentu ATLAS: izdelan ~ 2006 in **še vedno dobro deluje**
 - skupina z F9 sodelovala pri razvoju in izdelavi pasovnega detektorja

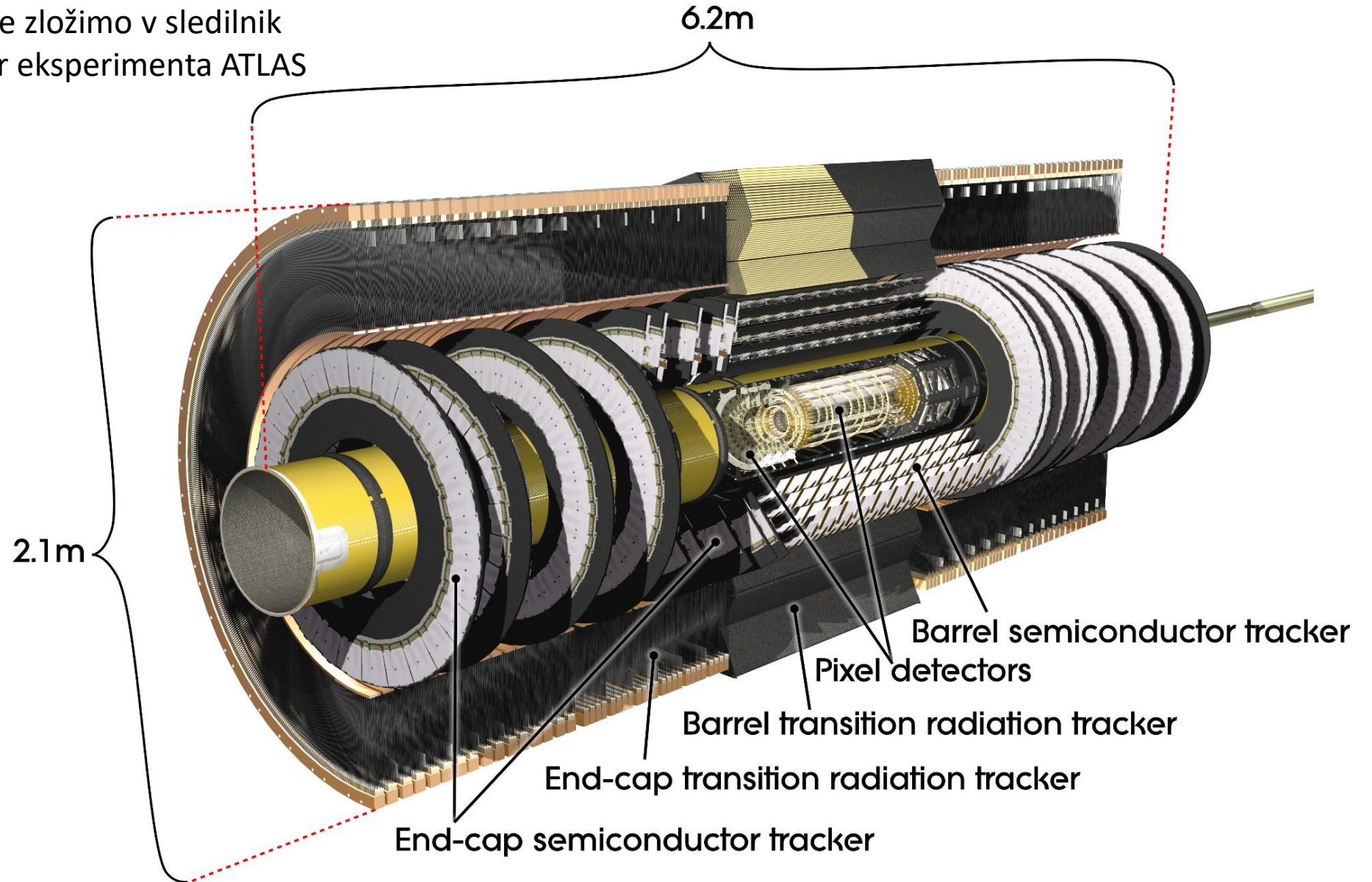
Moduli zloženi v valjasti del pasovnega detektorja



Spodnji detektor zasukan za majhen kot

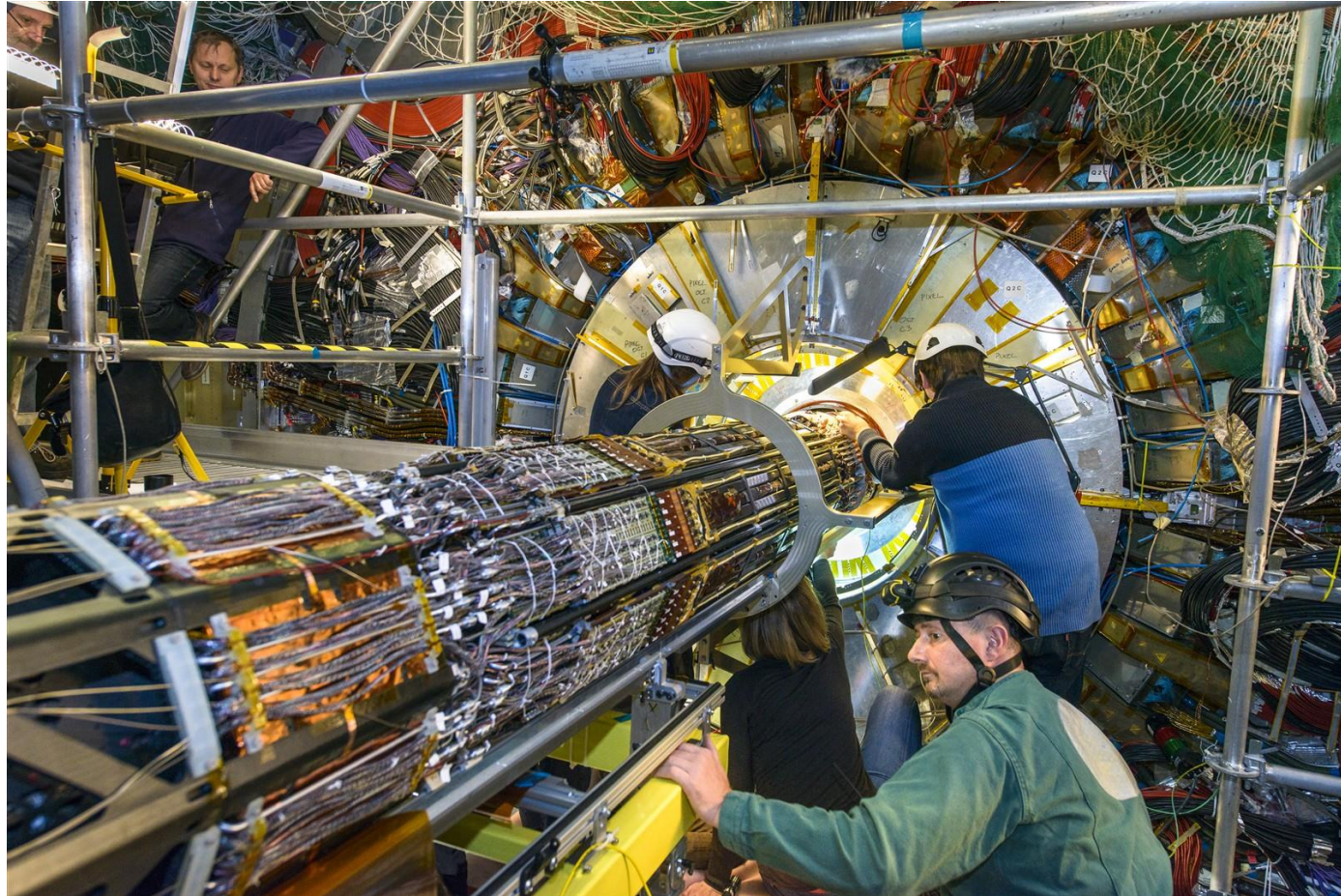
Sledilnik nabitih delcev

- Detektorske sisteme zložimo v sledilnik
→ notranji detektor eksperimenta ATLAS



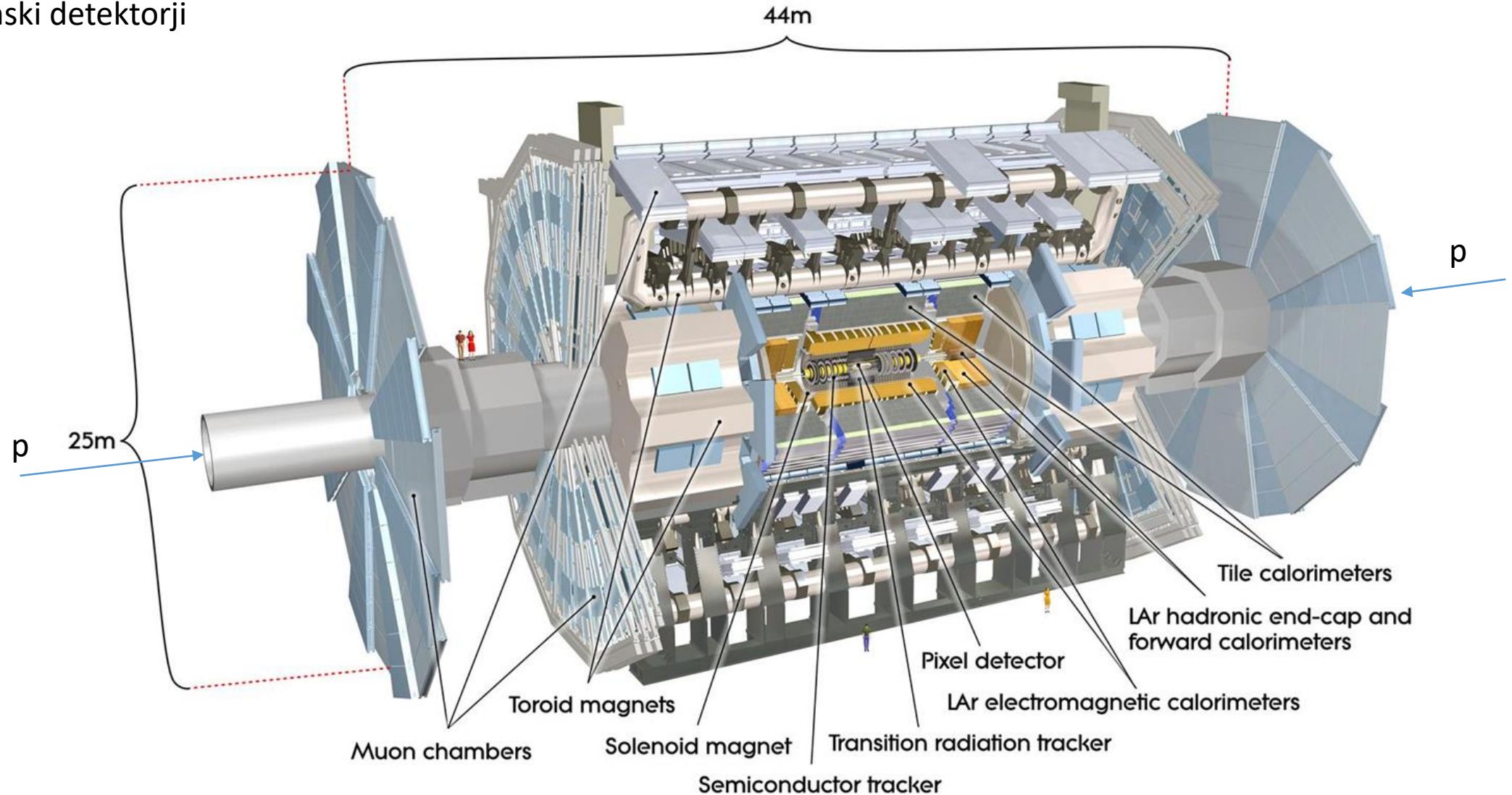
Detektorski sistem

Instalacija blaziničastega detektorja v eksperiment ATLAS



Eksperiment ATLAS

- Si detektorji najbližje interakcijski točki
- na večji oddaljenosti kalorimetri (merijo energijo, ustavijo delec)
- zadnji so mionski detektorji

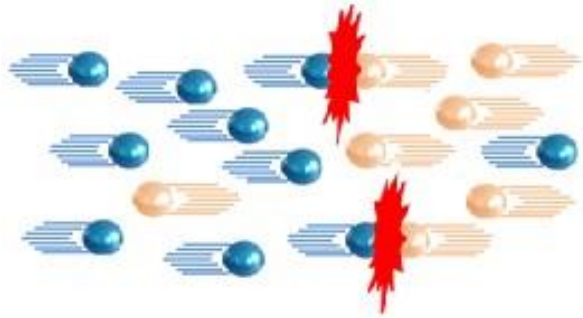


“Nov” trkalnik

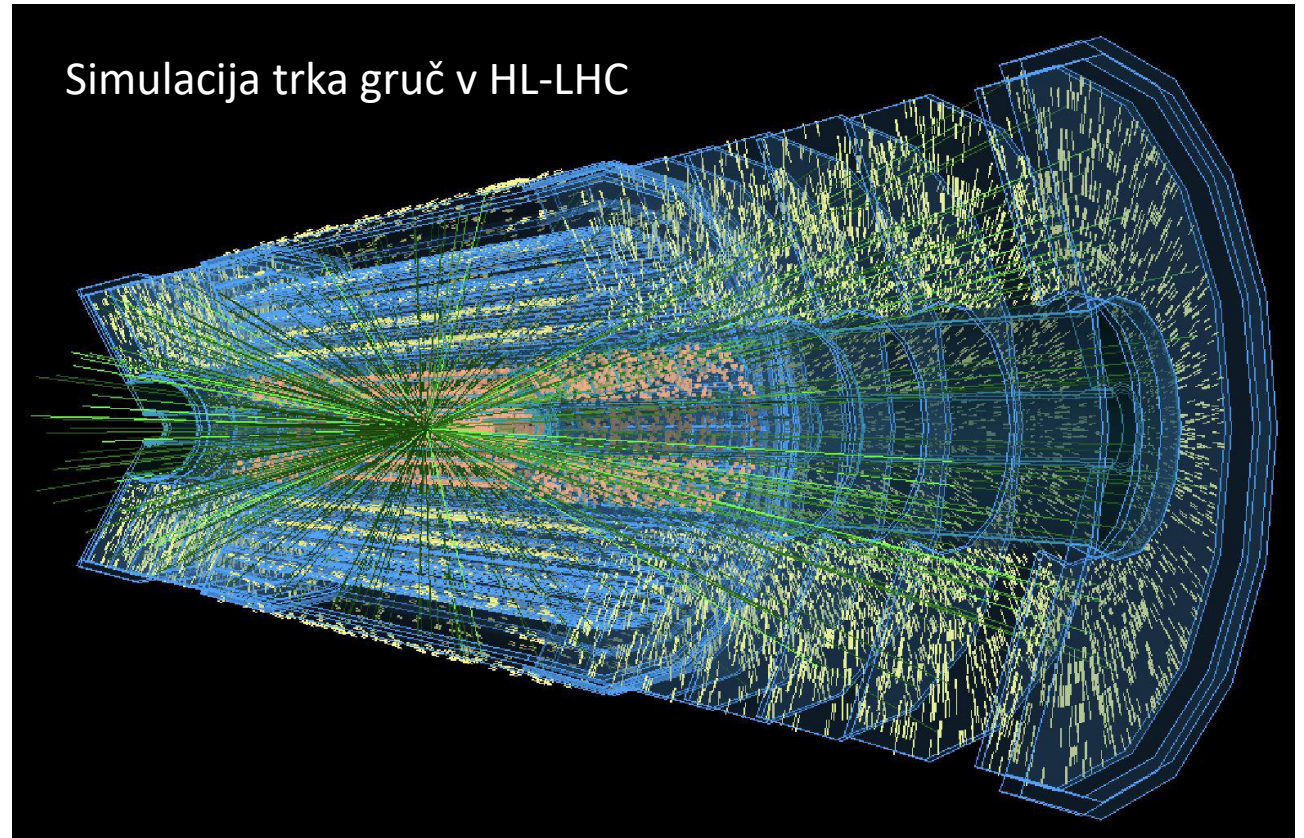
- Large Hadron Collider (**LHC**) (2008-2025)
 - **protoni z energijo 6.8 TeV**
 - **odkritje Higgsovega bozona!**
 - utrdil veljavo Standardnega Modela elektrošibke in močne interakcije osnovnih delcev
 - Standardni Model ni dokončna teorija
 - iščemo pojave, ki jih **SM** ne more opisati → **“nova fizika”**
- do sedaj na **LHC** nismo opazili pojavov, ki jih standardni model ne bi mogel pojasniti
- **gradimo “nov” trkalnik: High Luminosity LHC: HL-LHC**
 - nadgradnja trkalnika LHC
 - začetek delovanja ~ 2029, zajemanje podatkov ~ 10 let
 - energija protonov (**6.8 TeV**) kot LHC
 - **5x večja luminoznost kot LHC (večja pogostost trkov protonov)**
 - poveča verjetnost, da bomo zaznali redek pojav **“nove fizike”**
 - večja natančnost meritev znanih procesov → lahko razkrije odstopanja od napovedi **SM**

HL-LHC

- visoka luminoznosti:
→ veliko število trkov ob srečanju gruč protonov



- **200 trkov** ob vsakem srečanju gruč
- gruče se srečujejo na vsakih **25 ns**

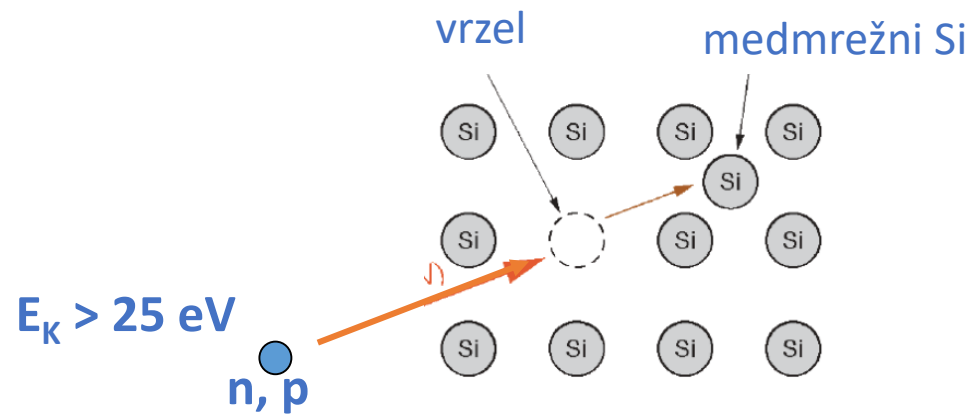


- v 10 letih delovanja bo veliko število delcev preletelo detektorje, ki so blizu interakcijske točke: **sevalne poškodbe**
- sevalne poškodbe so problem tudi na LHC, na HL-LHC bodo pa še večji problem

Sevalne poškodbe

- glavni problem za Si detektorje:
 - delec z zadostno energijo izbije Si atom iz kristalne rešetk

➔ posledica so lokalizirani energijske nivoji v prepovedanem pasu



Obsevanje v reaktorju

- z **nevtroni** v reaktorju **TRIGA na IJS** lahko v Si povzročimo **podobne poškodbe**, kot jih bo Si utrpel na HL-LHC
 - ➔ omogoča obsevanja vzorcev detektorjev in študij posledic sevalnih poškodb
 - ➔ **skupina z F9 med vodilnimi na področju preučevanja sevalnih poškodb v detektorjih nabitih delcev**

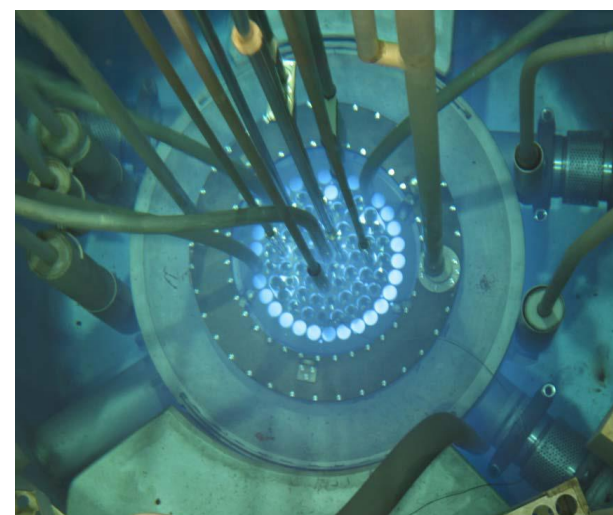
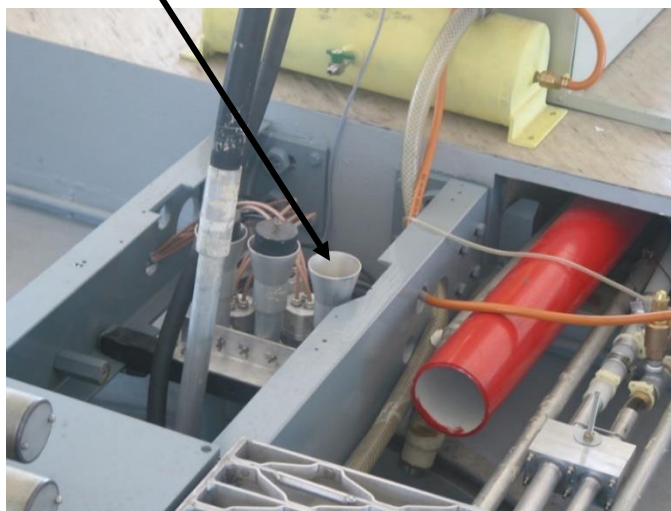
Vzorec -----> v posodi
obešeni na -----> po cevi ($\varnothing \sim 3$ cm) -----> spustimo v sredico reaktorja, ki je 5 m pod vodo.
laks



Mini pasovni detektor
 $1 \times 1 \text{ cm}^2$



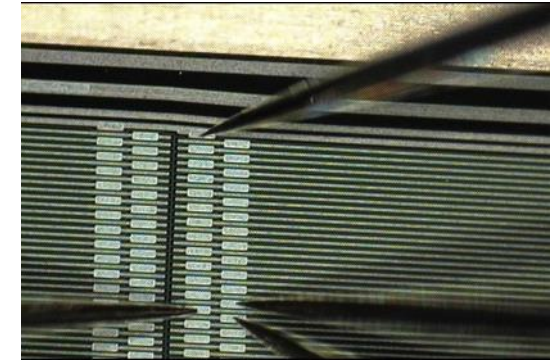
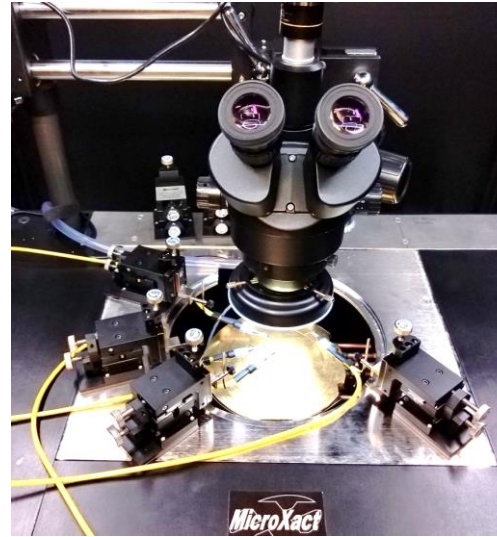
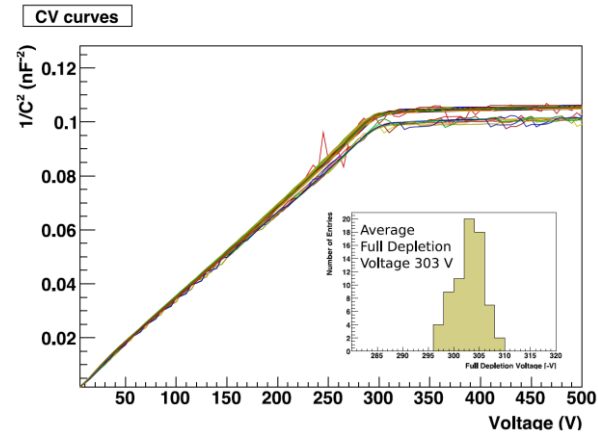
10 cm



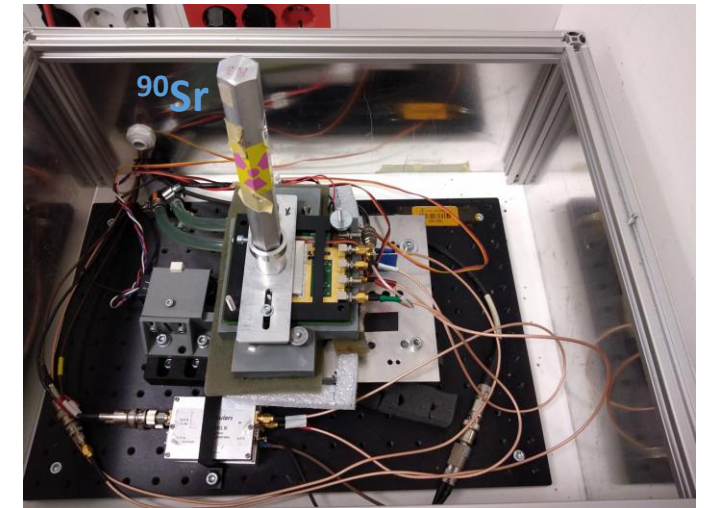
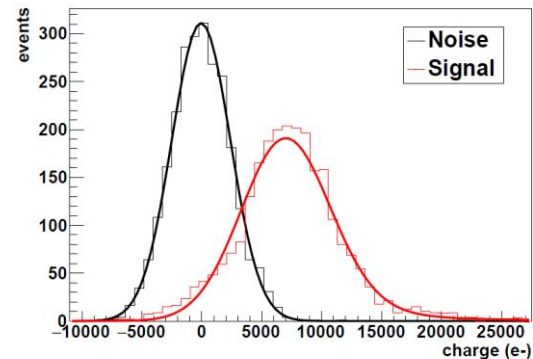
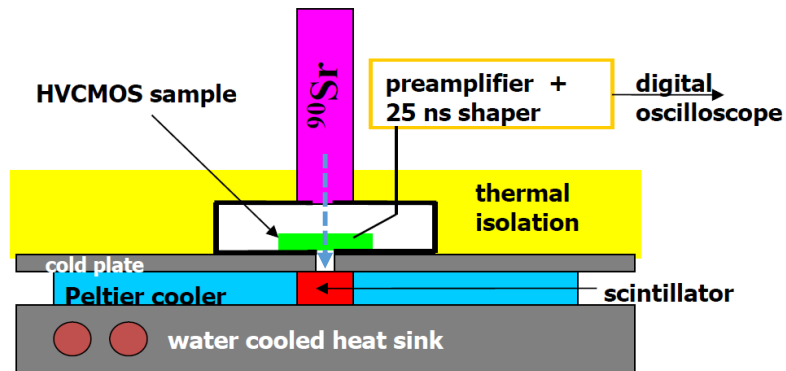
- porazdelitev hitrosti nevtronov v sredici enakomerna v vseh smereh
- poznamo **pretok** (fluks) nevtronov v obsevalnem kanalu φ [$\text{n/cm}^2/\text{s}$] in **čas obsevanja**
 - ➔ **fluencia** Φ [n/cm^2]

Merimo odvisnost od količine sevanja:

- kapaciteta, tok (CV-IV)



- signal (zbrani naboj), ki ga pri preletu skozi detektor povzroči elektron iz izvira ^{90}Sr z energijo $> \sim 1 \text{ MeV}$

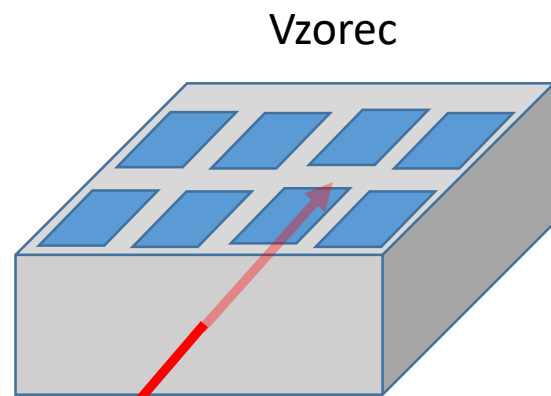
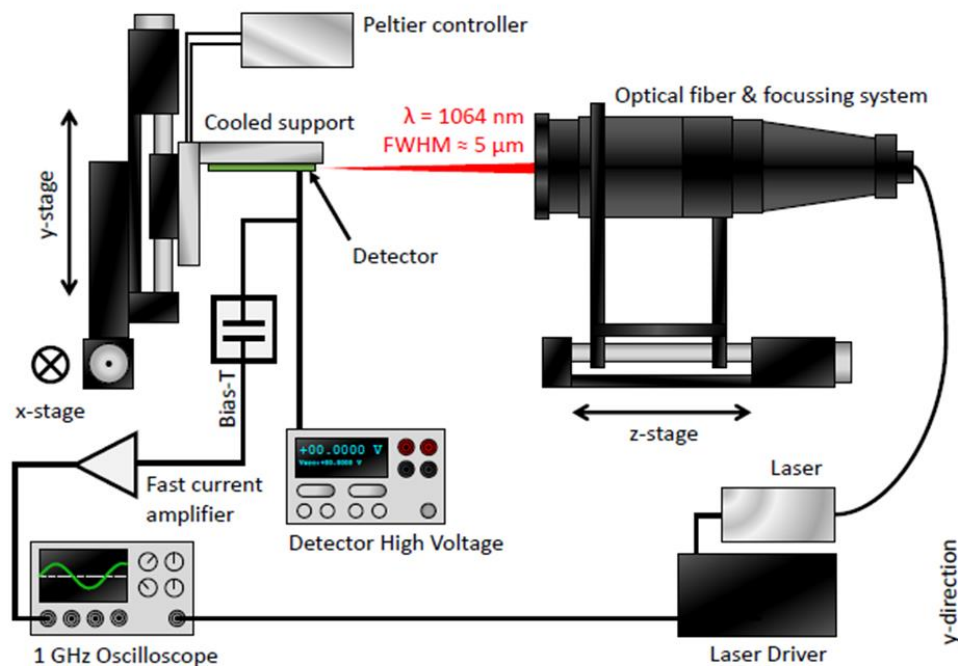


Eksperimentalna metoda Edge-TCT

- **metoda razvita na F9**

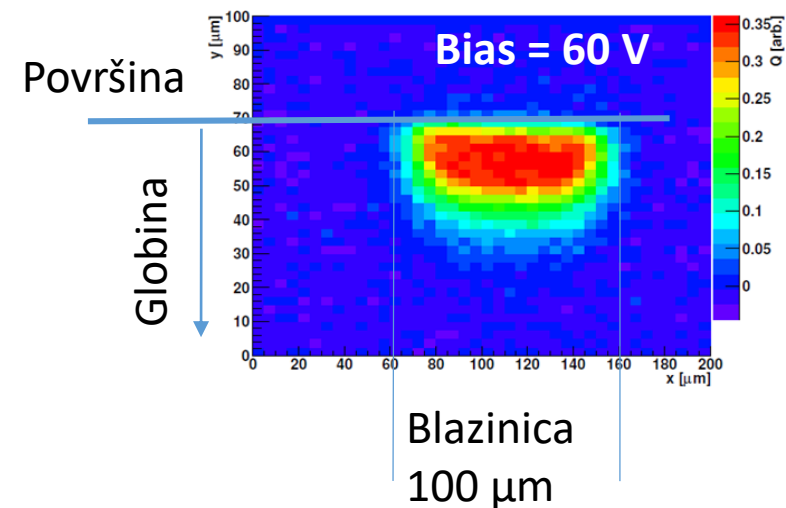
➔ ključno prispevala k razumevanju delovanj obsevanih detektorjev

- ozek laserski žarek vpada na rob detektorja **s strani**
- vidimo odziv na laserski sunek v odvisnosti od **globine**



Laser $\lambda = 1064 \text{ nm}$
vdorna globina v Si $\sim 1 \text{ mm}$

Primer: izmerimo globino osiromašenega področja

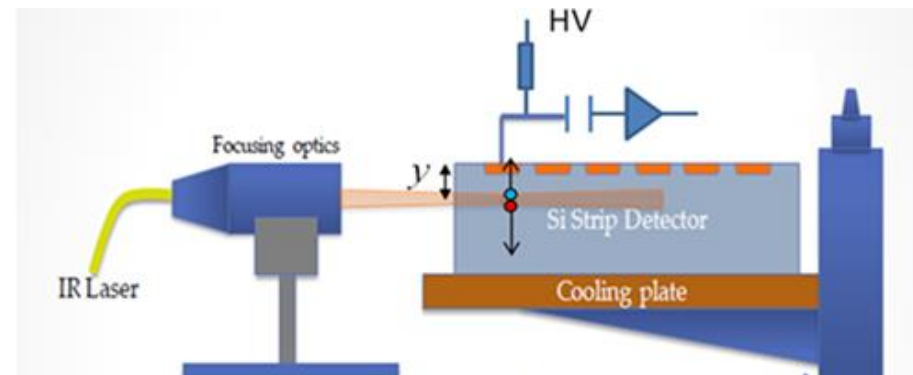
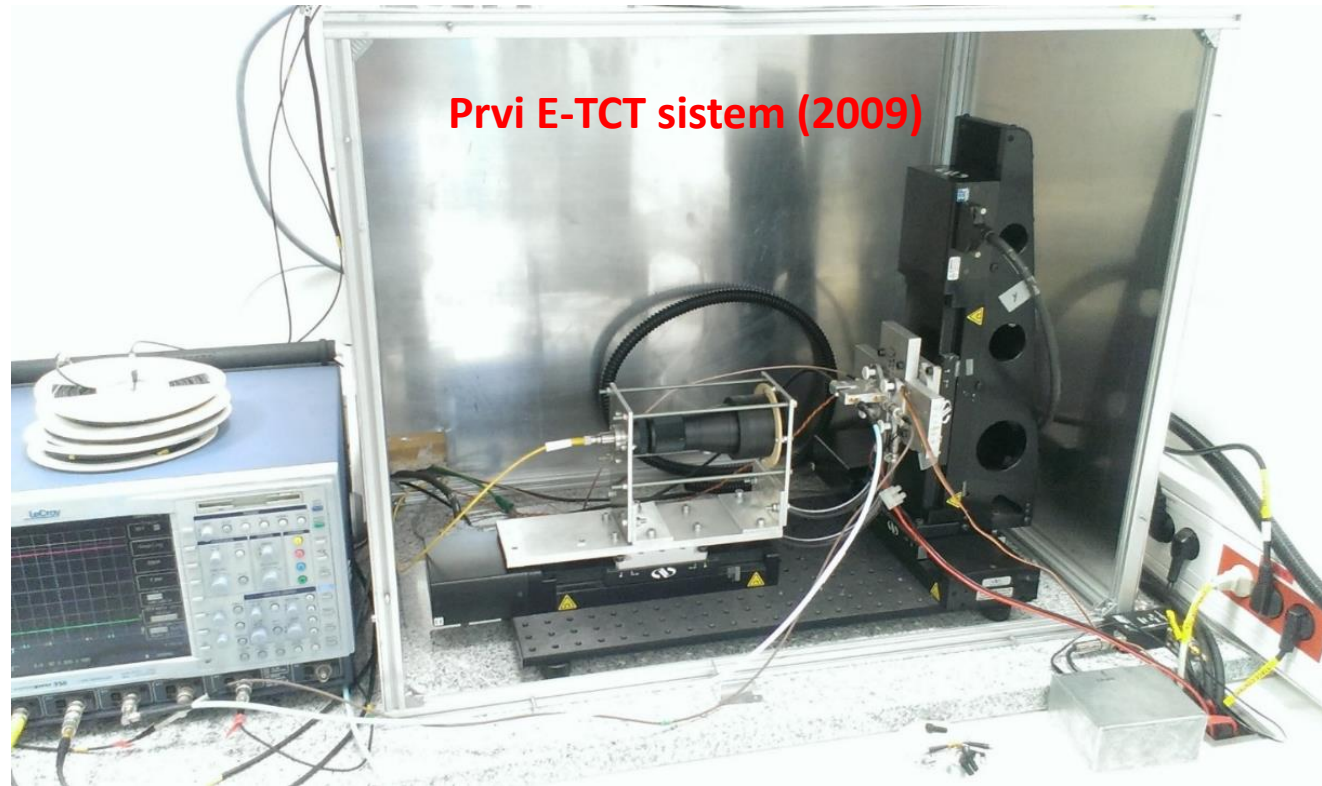


Prva objava o E-TCT:

G. Kramberger et al. IEEE TNS Vol. 57(4) 2010, p. 2294

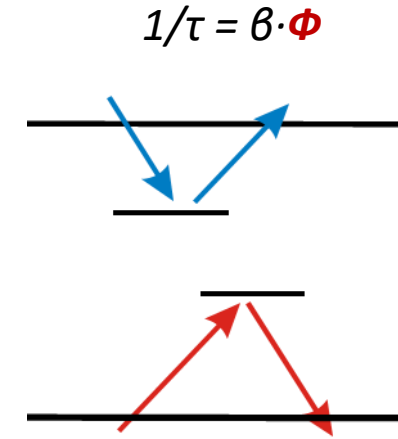
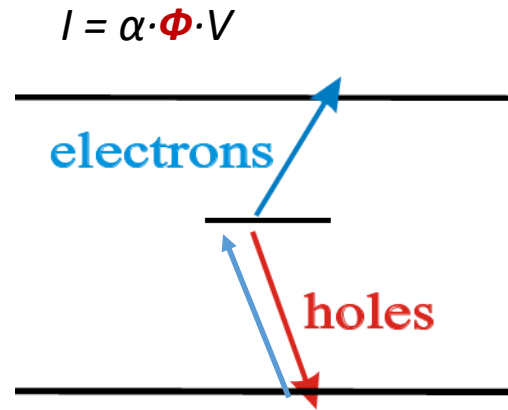
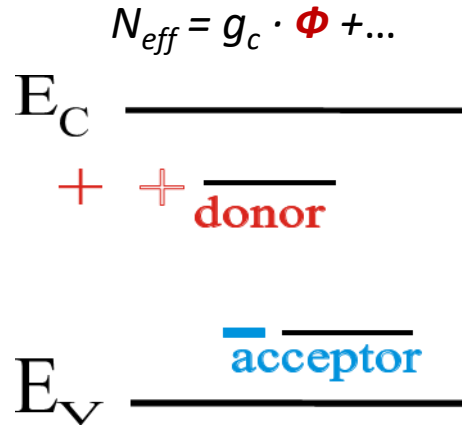
www.particulars.si

Eksperimentalna metoda Edge-TCT



Sevalne poškodbe

- zaradi sevalnih poškodb polprevodnika: **lokalizirani energijski nivoji v prepovedanem pasu**



- poveča se efektivna gostota prostorskega naboja

→ **višja napetost za osiromašenje detektorja**

- povečana verjetnost za termično generacijo nosilcev naboja

→ **povečan zaporni tok (segrevanje, šum)**

- povečana verjetnost za začasno ujetje nosilcev naboja

→ **zmanjšan signal**

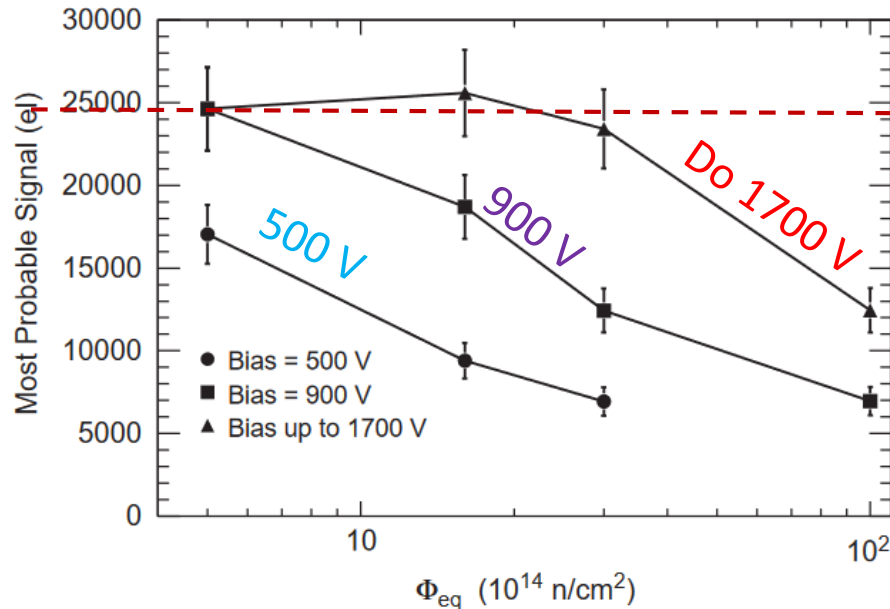
Prilagajanje na sevalne poškodbe

1) hlajenje:

- zaporni (mrtvi) tok se prepolovi z $\Delta T = -7^\circ\text{C} \rightarrow$ delovna T npr.: -35°C

2) višja zaporna napetost:

- razširitev osiromašenega območja $w \sim \sqrt{(\rho \cdot V)}$
- večje E polje, **višja hitrost nosilcev**, prepotujejo **daljšo pot preden se ujamejo**
- pri zelo visokih napetostih začne prispevati tudi **pomnoževanje naboja**: elektroni se v detektorju toliko pospešijo, da tudi sami ionizirajo (**ojačenje**)



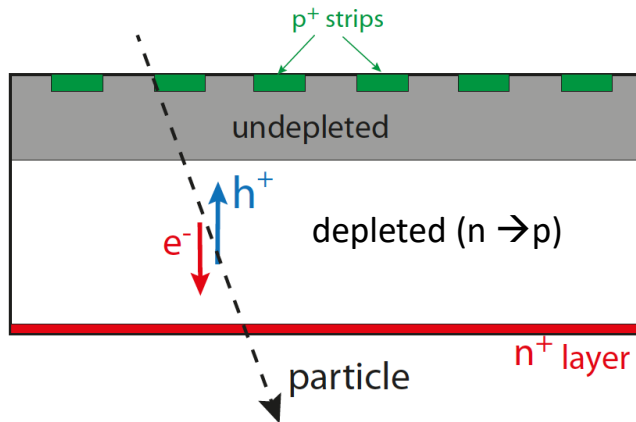
Signal nepoškodovanega detektorja brez pomnoževanja

Prilagajanje na sevalne poškodbe

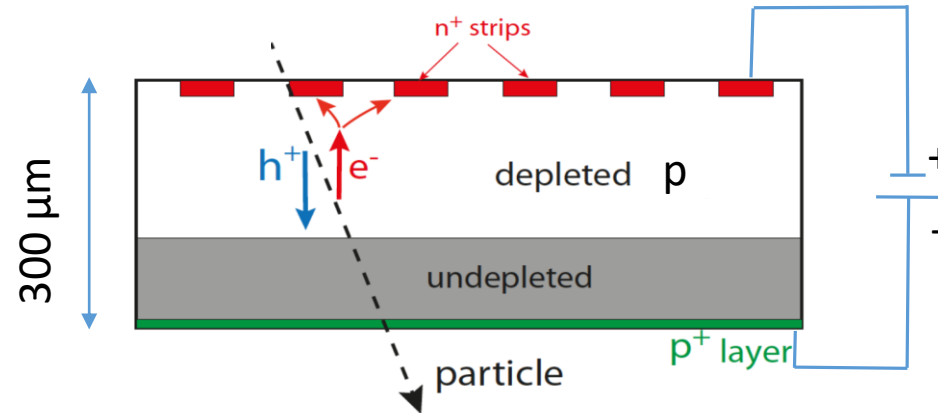
3) pasovi oz. blazinice iz n-tipa silicija:

- proti bralni elektrodi potujejo **elektroni**
 - ➔ **višja gibljivost**, prepotujejo daljšo pot preden se ujamejo
 - ➔ **utežno polje**: gibanje naboja v bližini bralne elektrode prispeva več k signal (**Ramov teorem**)
- po obsevanju je Si efektivno **p-tip**, zato bo **p-n** stik (visoko E polje) ostal pri bralni elektrodi

Bralna elektroda **p-tip**
(cenejša izdelava)



Bralna elektroda **n-tip** (detektorji na HL-LHC)



- zbiranje elektronov ➔ več signala po obsevanju

Prilagajanje na sevalne poškodbe

4) zmanjšamo razdaljo med elektrodami

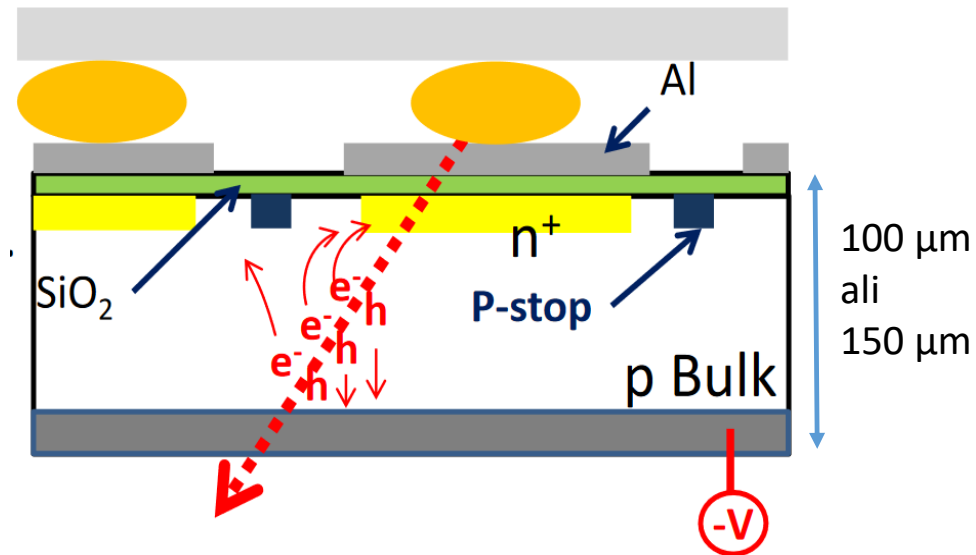
- največji prispevek k signalu, če nosilci naboja prispejo do elektrod (**Ramov teorem**)
→ če je zaradi ujetja naboja pot nosilcev krajša kot razmik med elektrodami:

a) se spleča planarni detektor stanjšati
ali

b) uporabimo 3D detektor

Planarni blaziničasti detektorji za HL-LHC:

- blazinice $50 \times 50 \mu\text{m}^2$
- debelina $100 \mu\text{m}$ ali $150 \mu\text{m}$
- napetost do **700 V!**

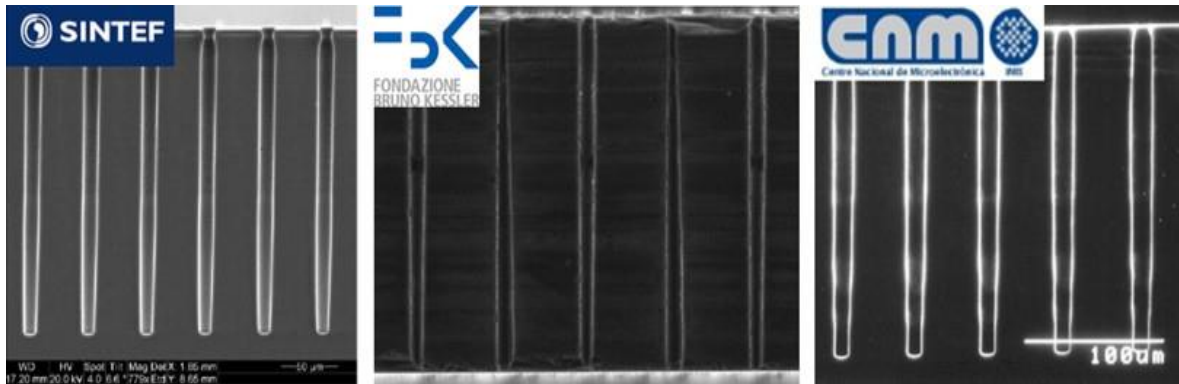


3D detektorji

Elektrode v vrtnah v siliciju

→ dolga pot nabitega delca skozi osiromašeno plast in kratka razdalja med elektrodami

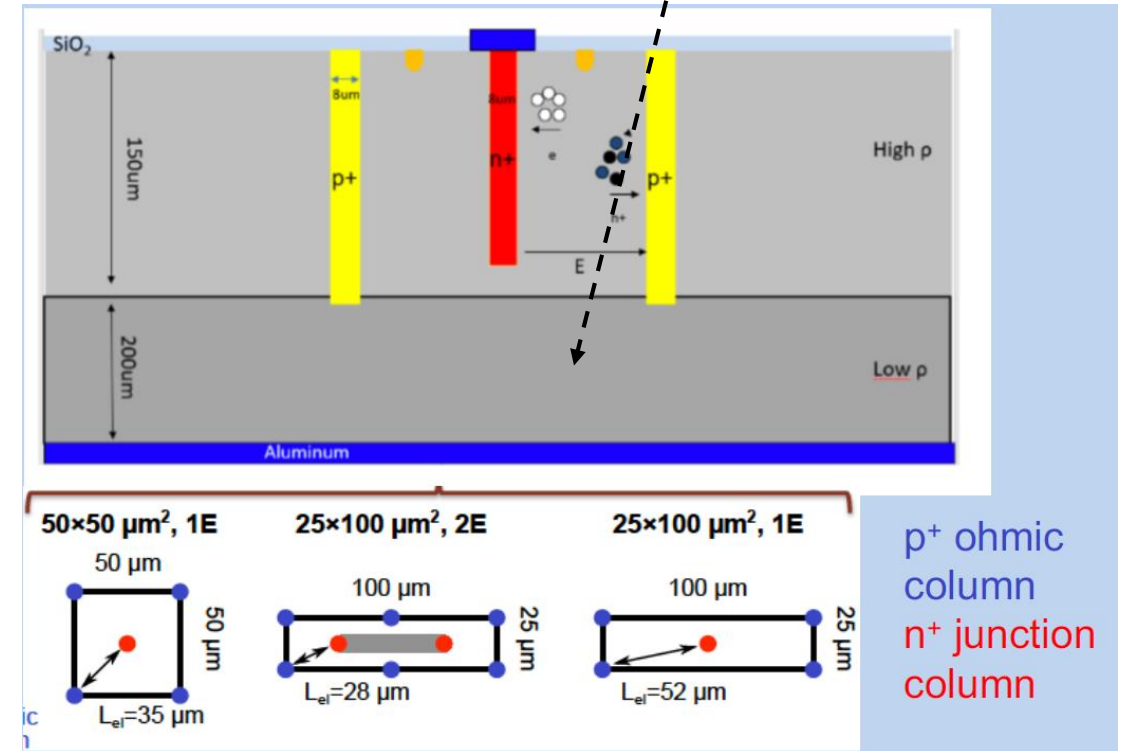
- vrtine v Si naredijo z jedkanjem (DRIE) in z difuzijo dodajo P ali B



C. Da Via et al., Nucl. Instr. And Meth. A694 (2012) 321
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.07.058>

Prva objava o 3D detektorjih:
S.I. Parker, C.J. Kenny, J. Segal, Nucl. Instr. and Meth. A395 (1997) 328.

3D blaziničasti detektor za HL-LHC

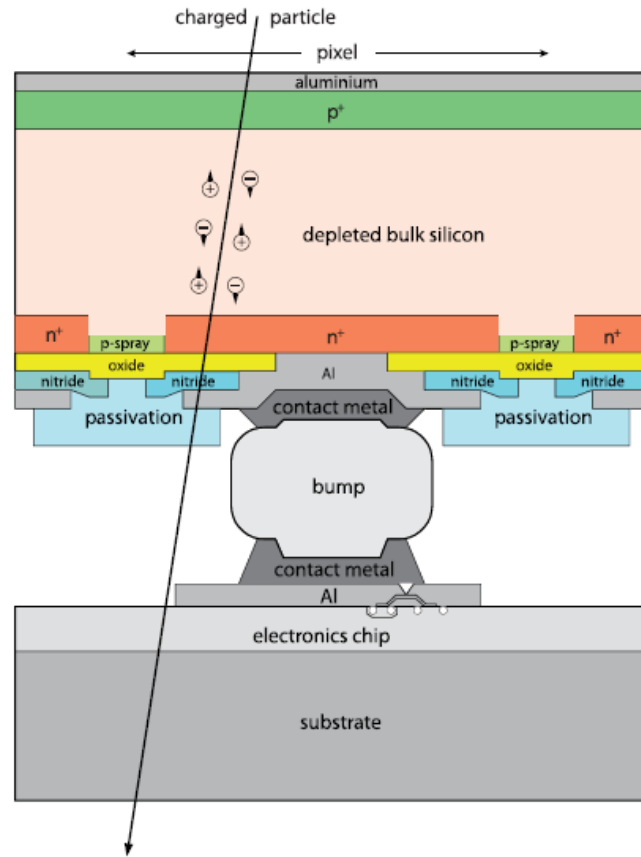


- majhna razdalja med elektrodami (< 50 μm)
- pot nabitega delca med elektrodami daljša
→ več sproščene naboja

DMAPS za HL-LHC

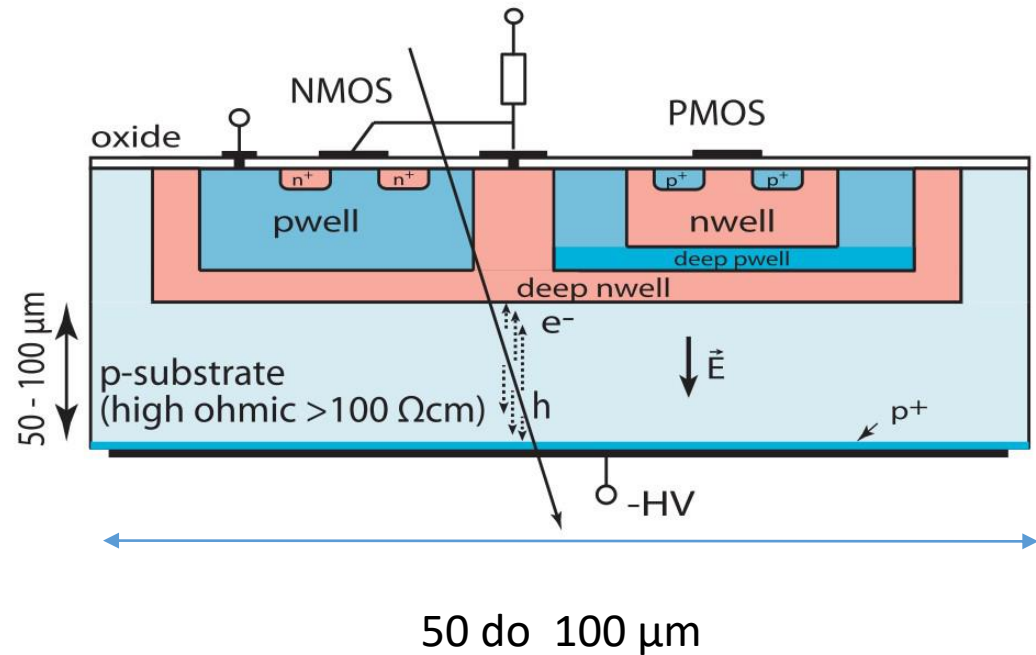
- Depleted Monolithic Active Pixel Sensor (DMAPS)

Hibridni detektor



CMOS DMAPS detektor

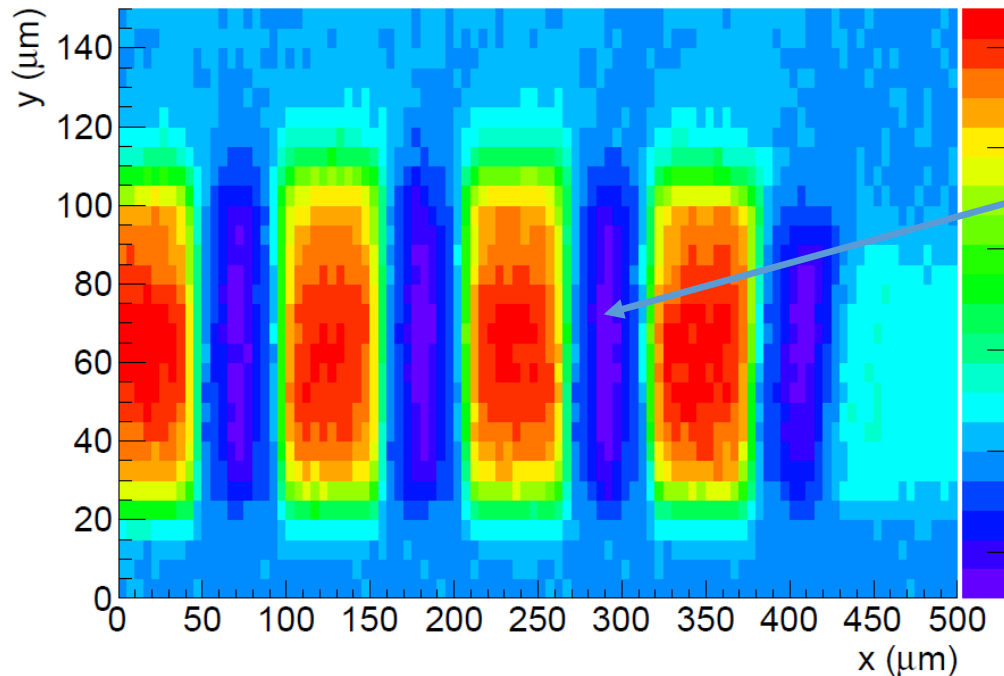
- bralna elektronika in detektor na istem čipu
- enostavnejša in cenejša izdelava, manj materiala



DMAPS

- kolaboracija ATLAS je preučevala možnosti za uporabo DMAPS za za HL-LHC
 - ➔ problem za uporabo na HL-LHC: učinkovitost po vsej površini tudi ko so poškodovani zaradi sevanja
- F9 dosti prispeval k tem raziskavam
 - ➔ Dr. Bojan Hiti, Zlati znak Jožefa Stefana 2023 za doktorsko delo s tega področja

- **E-TCT** meritev iz: *B. Hiti et al. 2017 JINST 12 P1002*



Neaktivna področja med blazinicami se pojavijo po obsevanju

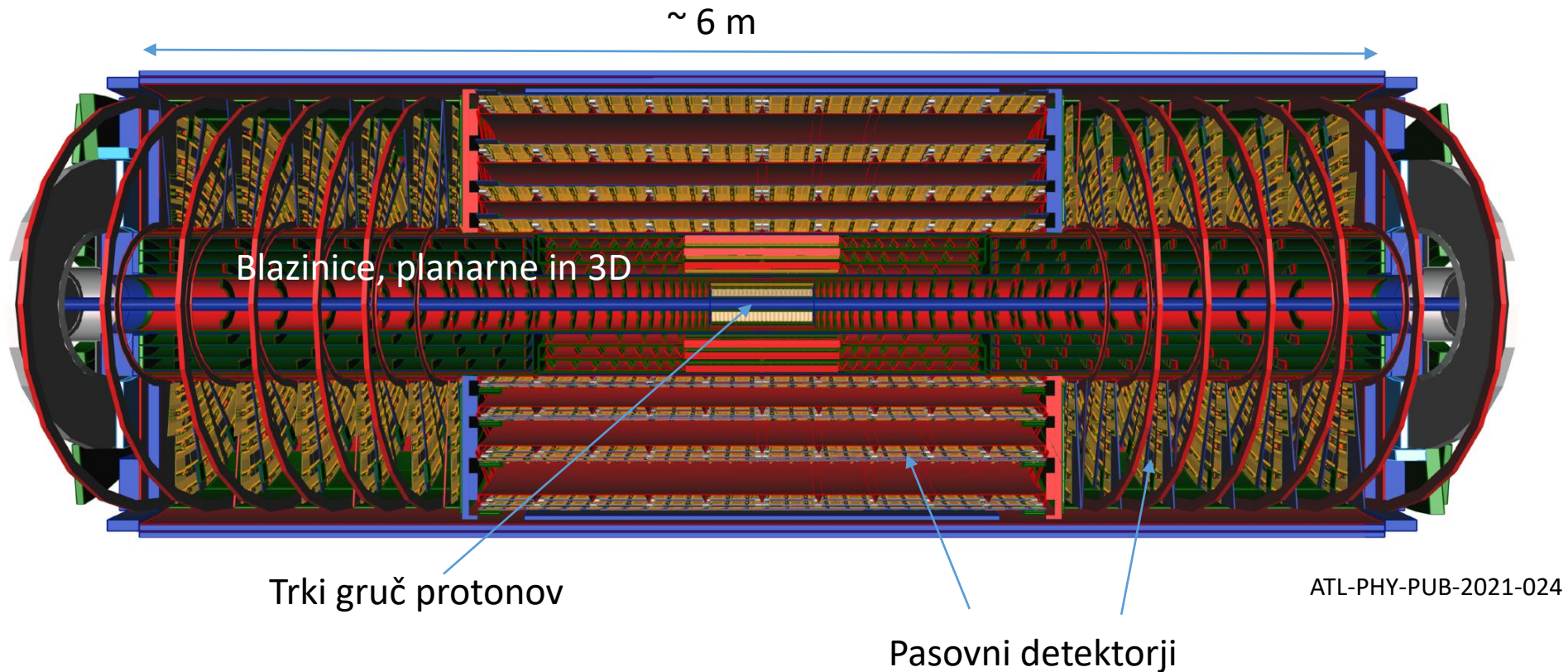
- Brez **E-TCT** bi bila takšna meritev zelo zahtevna (testni žarek ...)

DMAPS

- DMAPS ne bodo uporabljeni v ATLAS na HL-LHC, ker se je razvoj začel prepozno (~ 2014)
→ **vendar se vsi strinjajo, da bo to tehnologija za prihodnje detektorje**
 - večja segmentacija, tanjši detektorji → večja natančnost
 - enostavnejša izdelava, ker ni tehnološko zahtevnega povezovanja med detektorjem in elektroniko
 - možnost izdelave detektorjev v velikih obratih, ki izdelujejo komercialno elektroniko
 - veliko hitrejša in cenejša izdelava velikih površin detektorjev
 - več dobaviteljev

Detektorji za HL-LHC

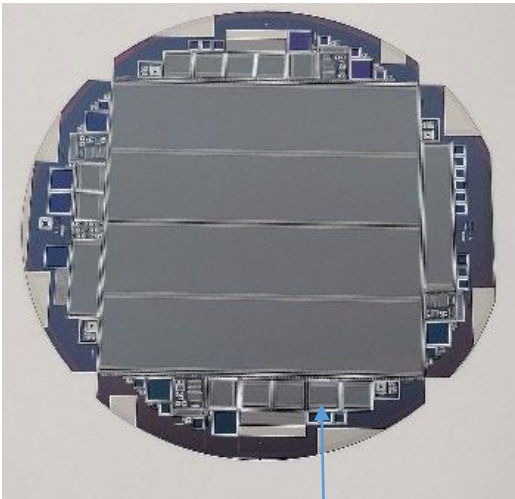
- povečanja gostote sledi nabitih delcev in sevanja na HL – LHC
 - sledilnik, ki v eksperimentu ATLAS deluje sedaj, ni primeren za HL-LHC
- ➔ gradimo **nov sistem** za sledenje nabitih delcev v eksperimentu ATLAS: **Inner Tracker – ITk**
- sestavljen bo leta ~2027



Detektorji za HL-LHC

- **proizvodnja pasovnih detektorjev v teku**
 - s pasovnimi detektorji bo pokritih **165 m²**: več kot **20000** detektorjev velikosti 10x10 cm²
 - izdelava bo trajala ~ 4 leta, do sedaj izdelanih približno polovica
 - **F9** sodeluje pri nadzoru kvalitete:
 - obsevanja in meritve testnih struktur

Si rezina z detektorjem in testnimi strukturami



Testne strukture

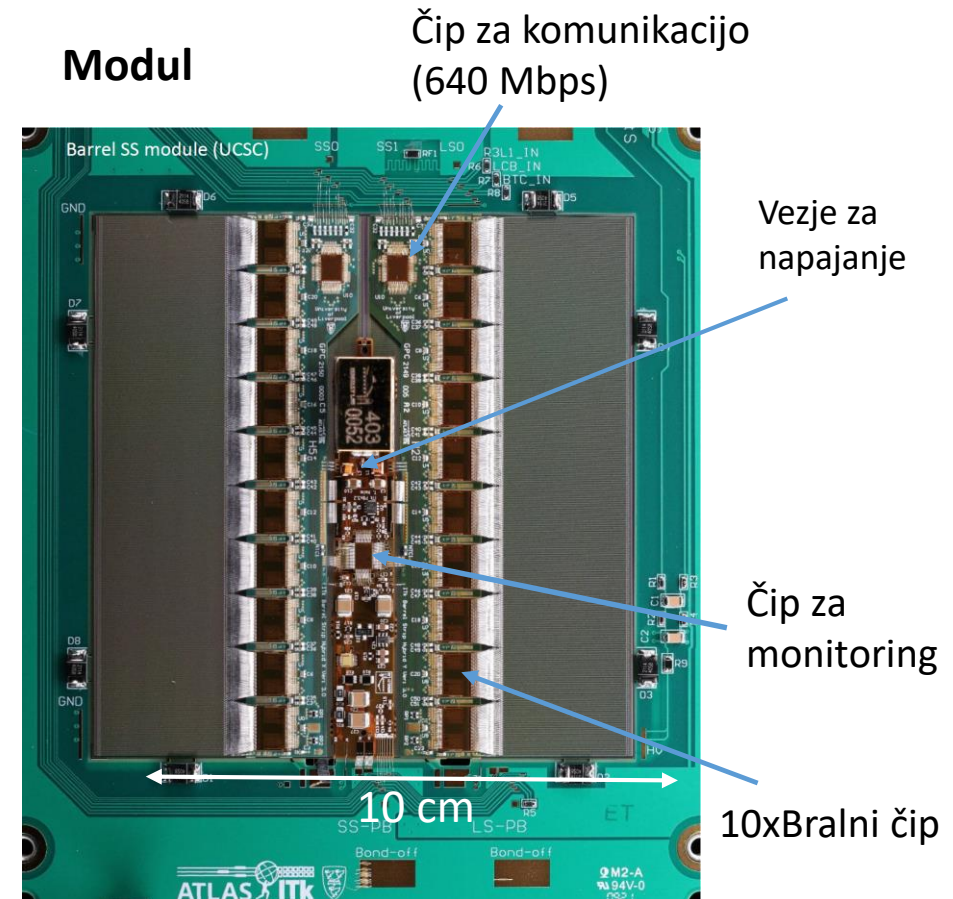
Pasovni detektor (10 cm x 10 cm)



Pasovni segmenti 4x2.5 cm

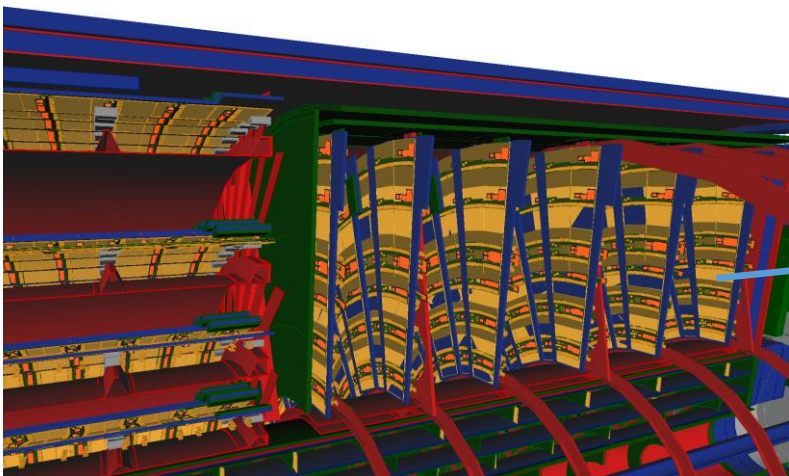
1280 pasov, 75.5 μm med pasovi

Modul

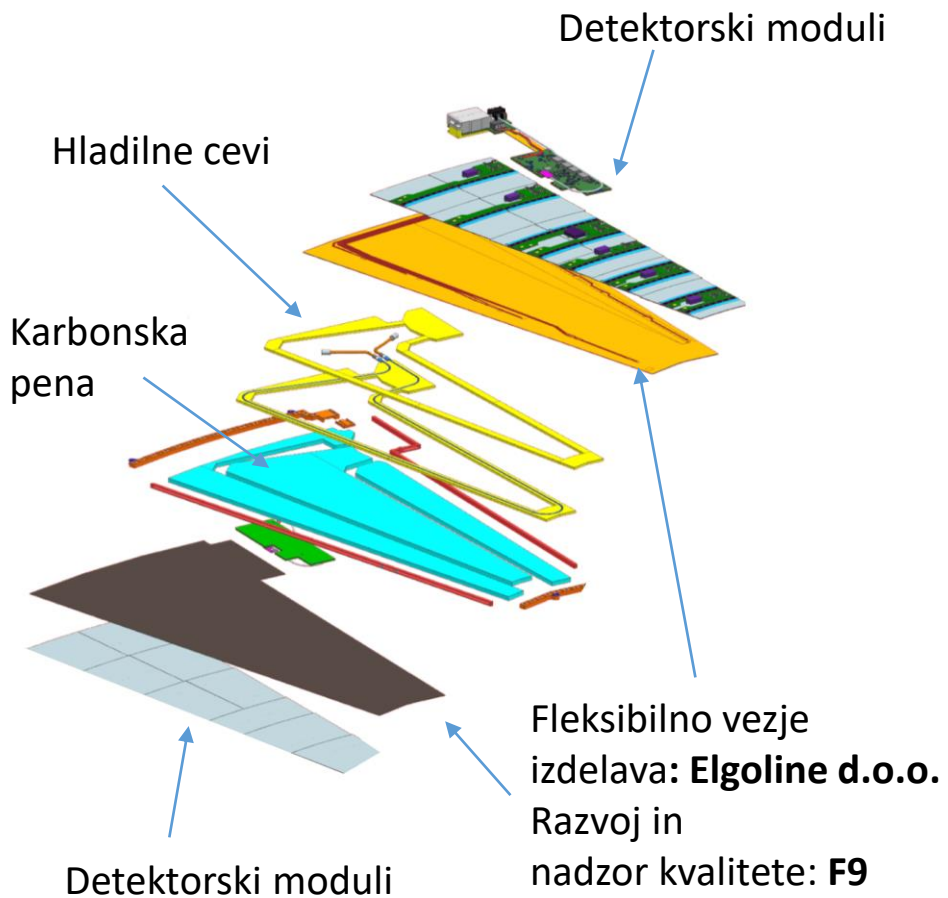


Detektorji za HL-LHC

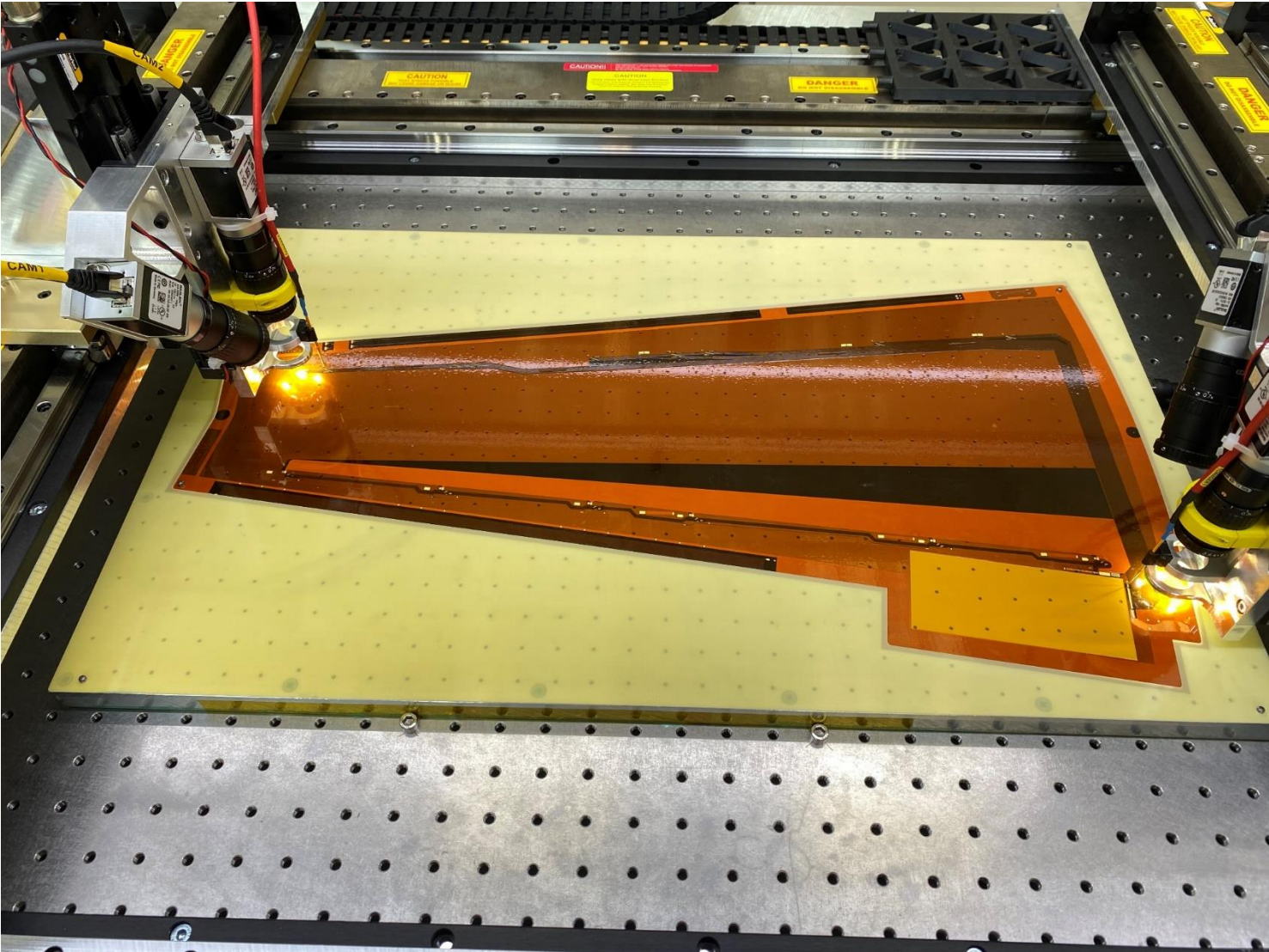
- pokrovi pasovnega detektorja sestavljeni iz “Petalov” (cvetni list)



“Petal”



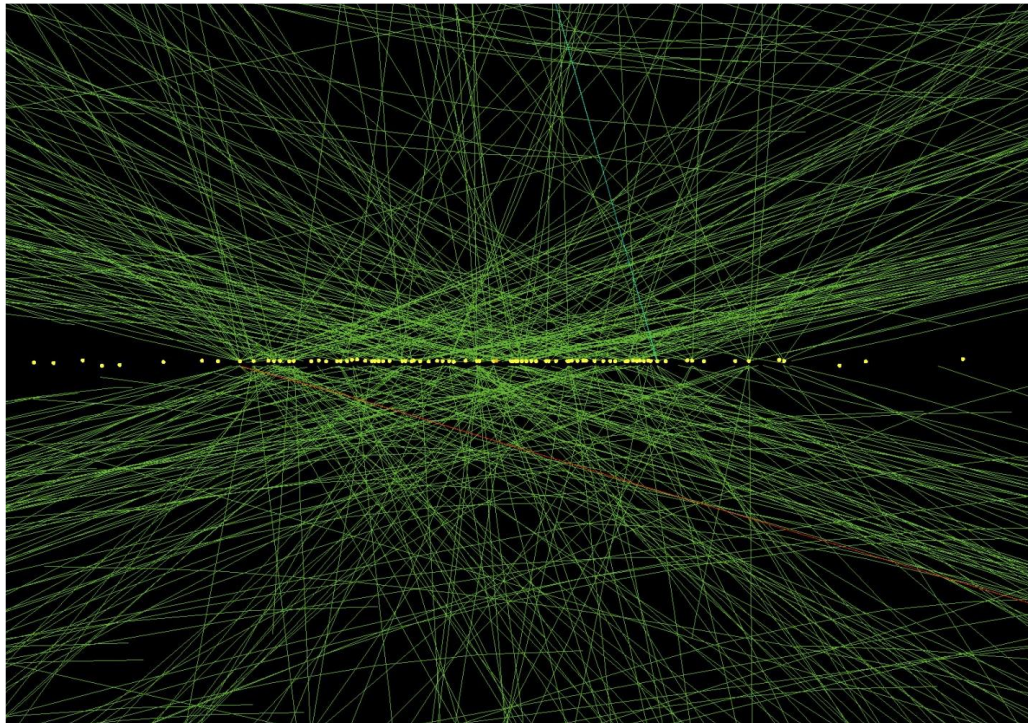
Robot za avtomatsko testiranje fleksibilnih vezij



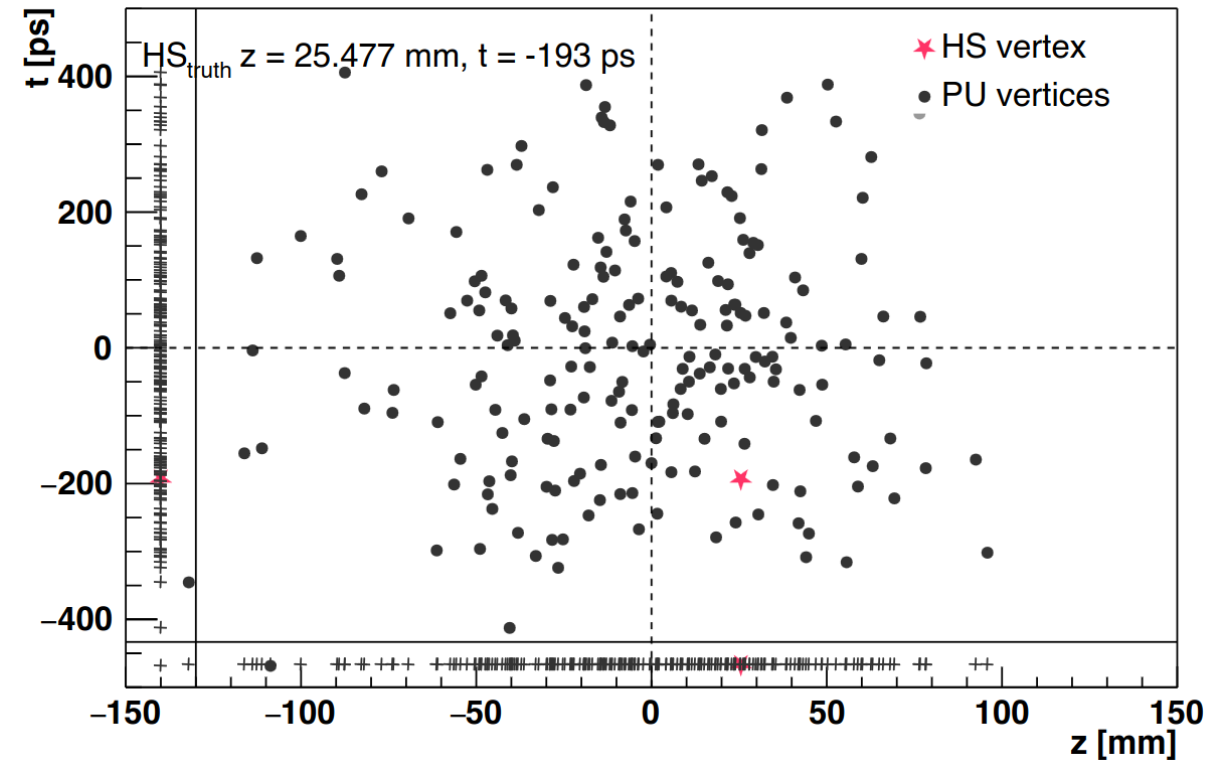
Detektorji za HL-LHC

Meritve časa preleta nabitih delcev

- na HL-LHC bo **200 trkov** ob vsakem srečanju gruč, **ločiti moramo zanimiv trk od ostalih**
 - iz različnih verteksov (vozlišč) pridejo nabiti delci do detektorja ob različnih časih
 - trki se zgodijo ob različnih časih
 - če lahko sledi razvrstimo **glede na čas preleta** skozi detektor, lažje pripišemo sledi zanimivemu verteksu



~ 30 cm



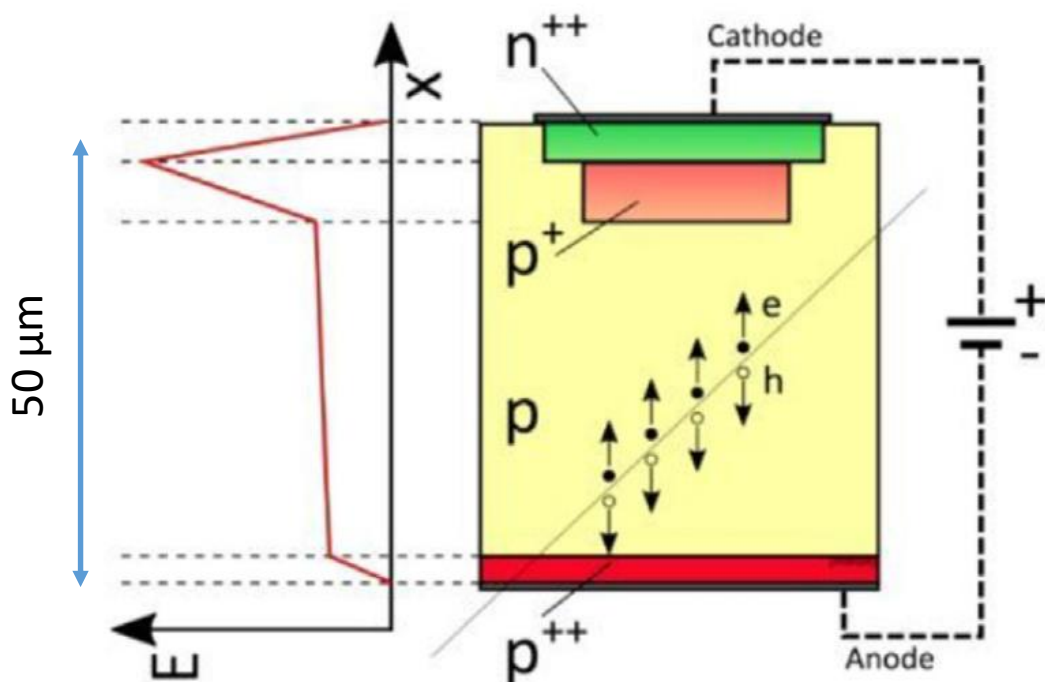
HL-LHC časovna ločljivost

Za dobro časovno ločljivost rabimo:

→ visok signal (visok S/N)

→ tanek detektor (hitro zbiranje)

pomnoževanje: elektroni se v detektorju toliko pospešijo, da tudi samo ionizirajo
→ signal se ojača že v detektorju



- pod zbiralno elektrodo dodamo ~ 2 μm debelo p-plast (podobno kot v **Avalanche Photo Diode - APD**)

- **Low Gain Avalanche Detector (LGAD)**

- nov tip detektorja za sledenje nabitih delcev

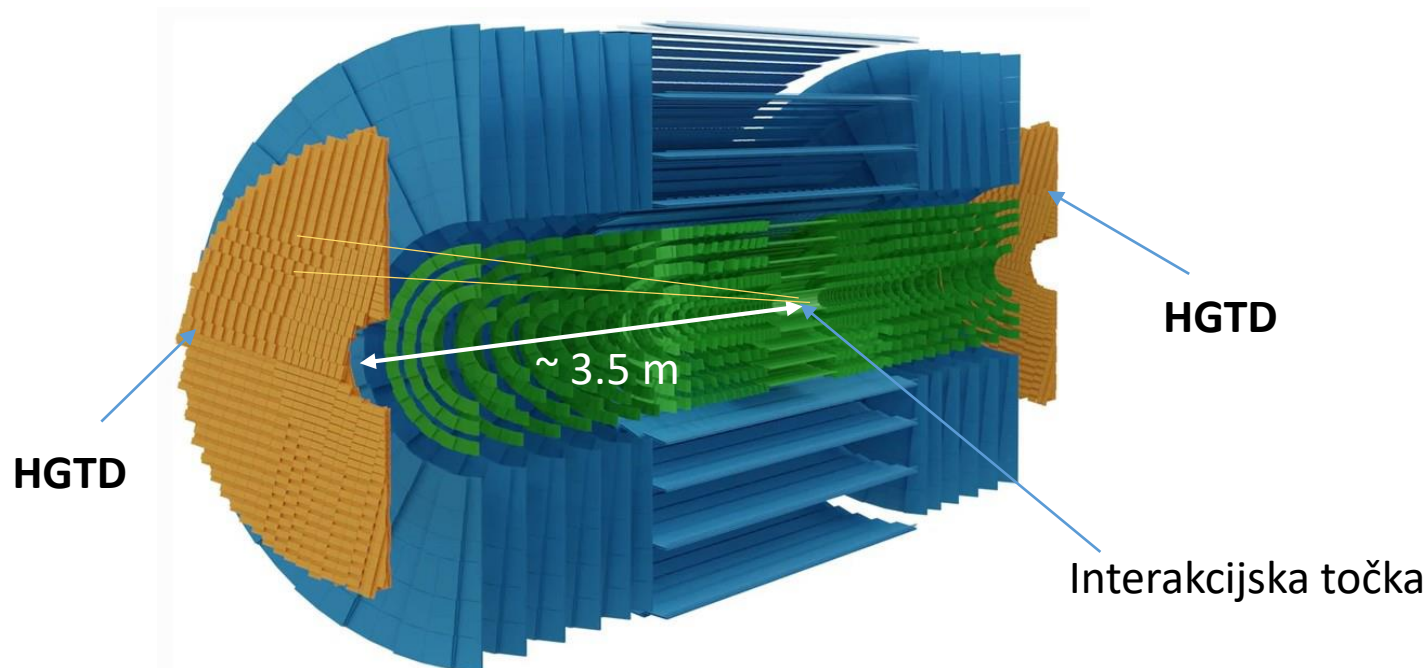
- časovna ločljivost 30 ps

Prva objava:

Pellegrini, Kramberger, Mandić et al. Nucl. Instr. and Meth. A765, (2014) p12

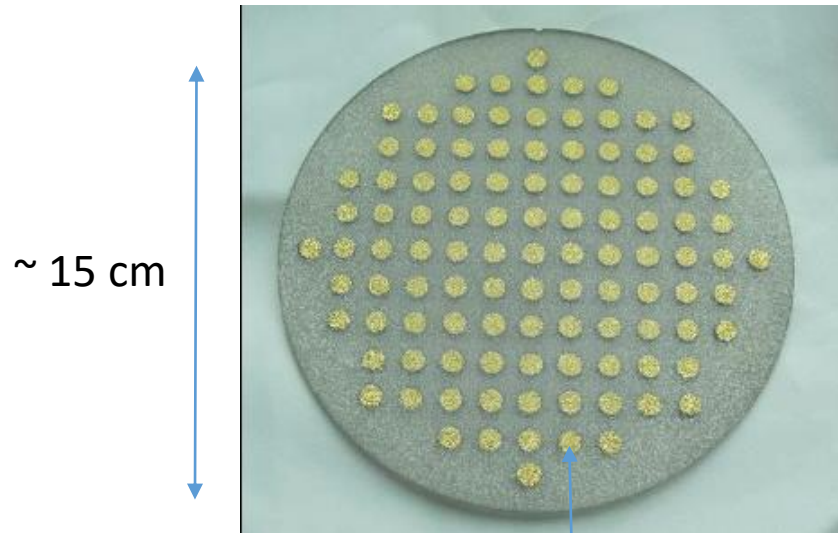
Detektorji za HL-LHC

- poseben detektorski sistem **High Granularity Timing Detector – HGTD** bo vgrajen v ATLAS ob nadgradnji za HL-LHC
→ pomemben prispevek F9 k razvoju detektorjev in izdelavi HGTD
- detektorji: 4 plasti LGAD, velikost blazinic: **1.3x1.3 mm²**, časovna ločljivost **~ 30 ps**
- **problem:** sevalne poškodbe povzročijo deaktivacijo Bora kot dopanta za p-tip (ne prispeva več k prostorskemu naboju)
 - zmanjšanje ojačenja v LGAD in zato poslabšanje časovne ločljivosti
 - ena prvih objav o tej problematiki: **G. Kramberger et al., 2015 JINST 10 P07006**
 - prilagoditev: dodajanje ogljika v pomnoževalno plast



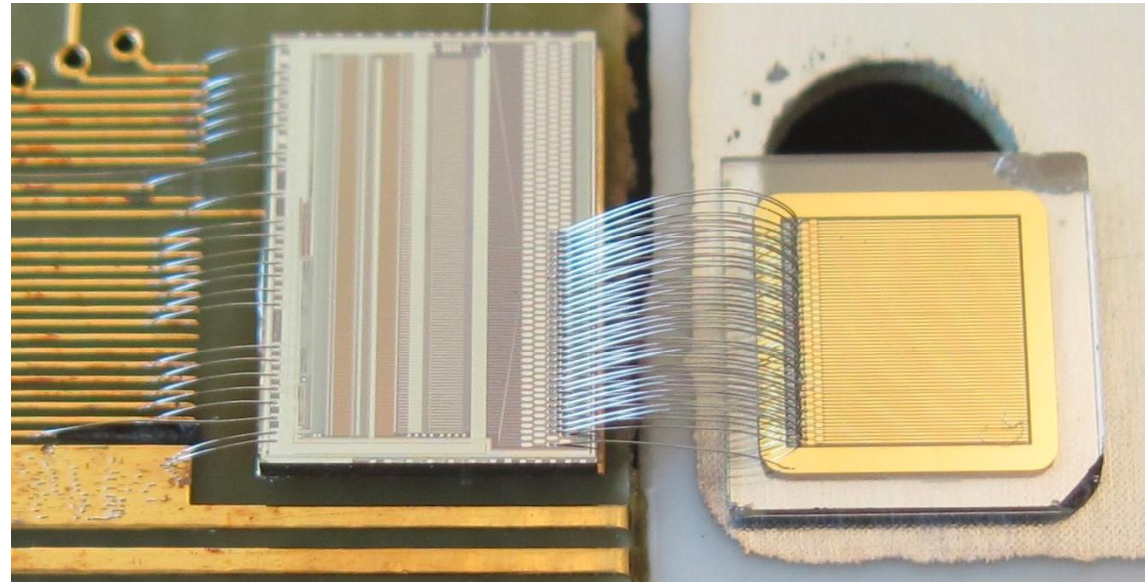
Diamantni detektorji

- diamant: velika širina prepovedanega pasu $E_g = 5.5 \text{ eV}$ (v Si $E_g = 1.1 \text{ eV}$)
 - ni prostih nosilcev naboja
 - ne rabimo P-N stika, na površino le naneseemo kovino (ni trivialno) in priključimo na visoko napetost
 - tudi po obsevanju se ne poveča zaporni tok → **ne rabimo hlajenja**
 - slabosti: → manj sproščenih nosilcev: **36** parov elektron-vrzel na μm (v Si **100** parov/ μm)
 - nosilci se ujamejo na mejah domen – pot nosilcev krajša kot debelina detektorja
 - **cena**



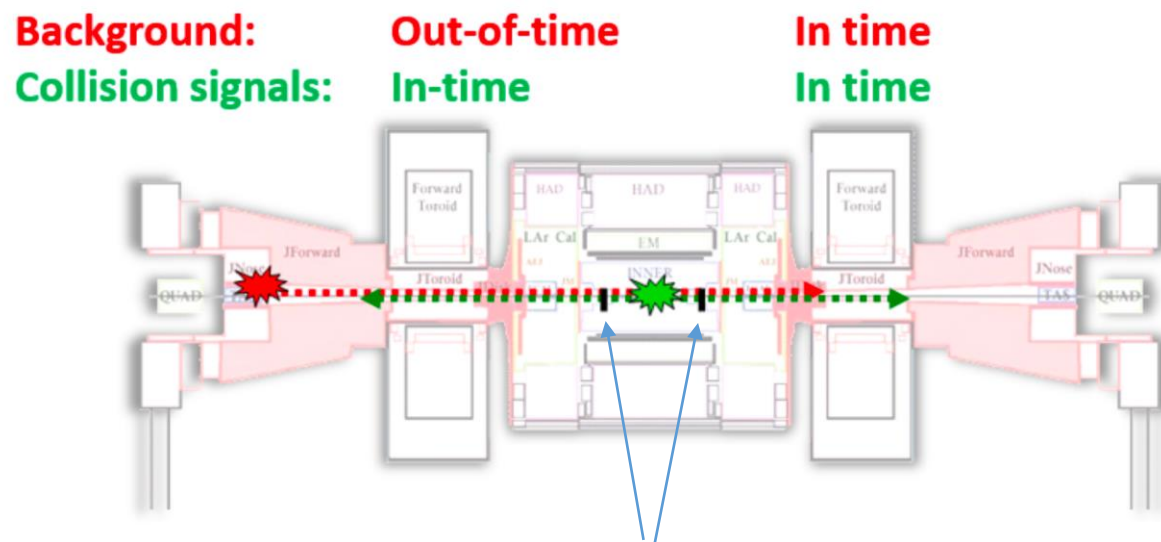
courtesy of II-VI company

elektrode (kovina)

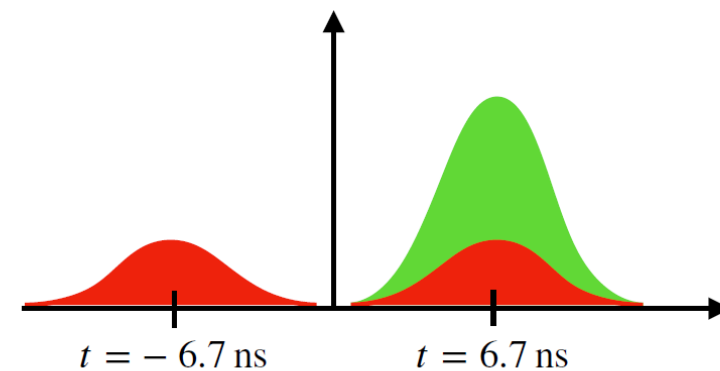


Diamant

- diamantne detektorje še ne moremo uporabljati za pokrivanje velikih površin
- v detektorju ATLAS **diamant uporabljamo** v sistemu BCM (in BCM' po nadgradnji)
 - zaznavanje nepravilnosti v protonskem žarku, meritve luminoznosti
- skupina z F9 vodi izgradnjo sistema BCM' za HL-LHC

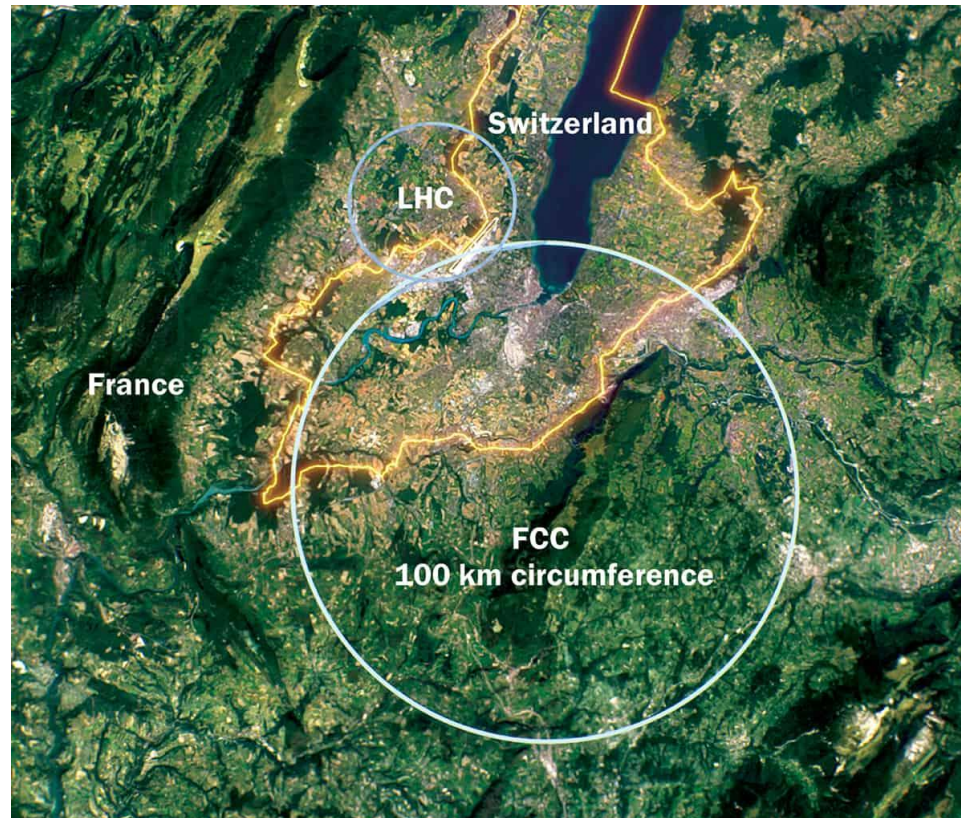


Diamantni detektorji oddaljeni
~ 180 cm od interakcijske toče v središču detektorja ATLAS



Bodoči trkalniki – bolj oddaljena prihodnost

- Future Circular Collider (FCC) v CERNu
 - najprej trkalnik elektronov **FCC_ee** z energijo trkov do 365 GeV (tovarne: Z, WW, Higgs, tt) → po letu ~ **2045**
 - sledila bo nadgradnja na trkalnik protonov **FCC_hh** z energijo trkov **100 TeV** (po letu ~ **2055**)
 - **1000 trkov** protonov ob vsakem srečanju gruč
 - **100x več sevalnih poškodb** kot HL-LHC

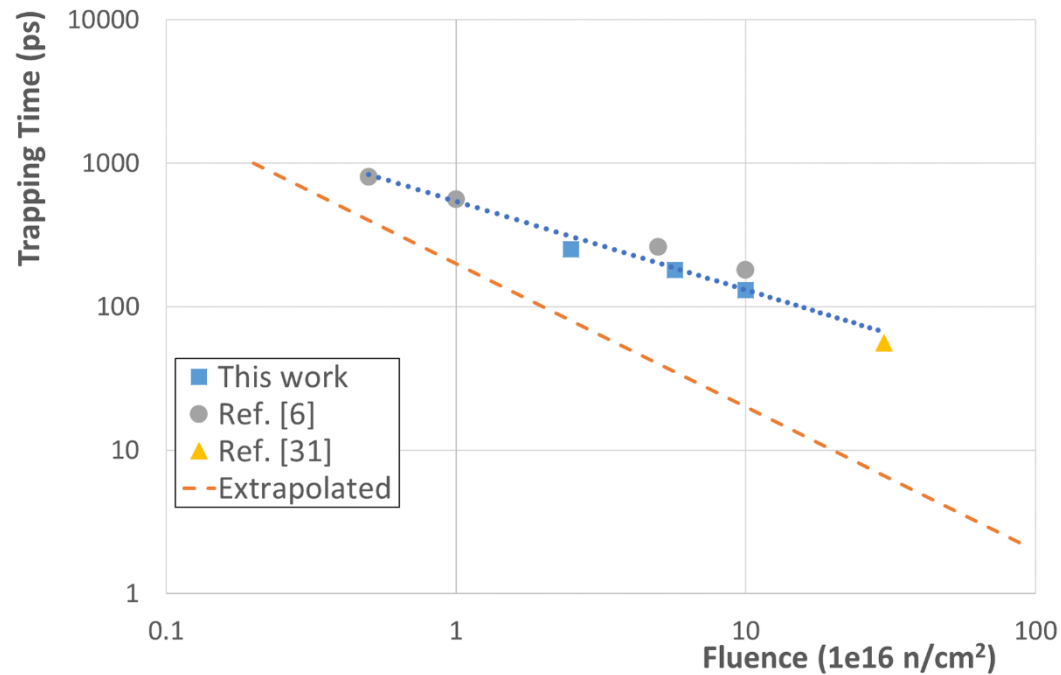


Detektorji za bodoče trkalnike

- detektorska tehnologija, ki bi ustrezala pogojem za **FCC_hh** še ne obstaja
- zelo malo vemo o obnašanju silicijevih detektorjev pri takšnih pogojih
 - ➔ obsevanje do najvišjih fluenc na reaktorju traja do 50 h
 - ➔ začenjajo se prve meritve

Primer (dobre novice):

- efektivni življenjski čas nosilcev pada počasneje kot napove ekstrapolacija

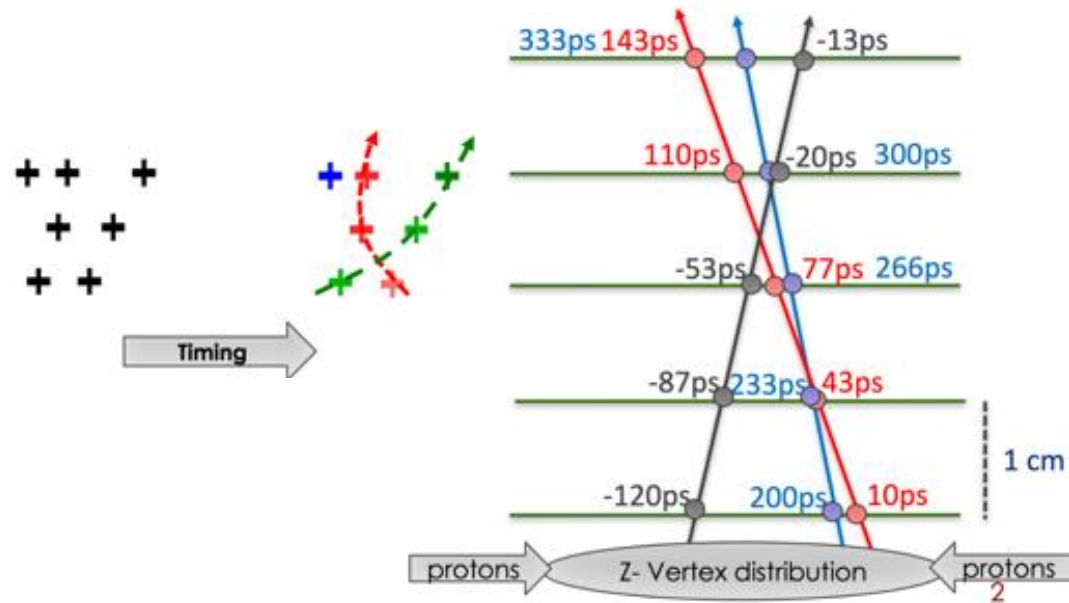


I.Mandić et al., JINST 15 P11018 (2020)

Detektorji za bodoče trkalnike

- časovna ločljivost boljša kot 5 ps

→ velika gostota sledi in verteksov: detektor bo moral poleg točke v prostoru natančno meriti tudi čas preleta da bomo lahko pravilno pripisali točke sledem (**4D tracking**)



Detektorji za bodoče trkalnike

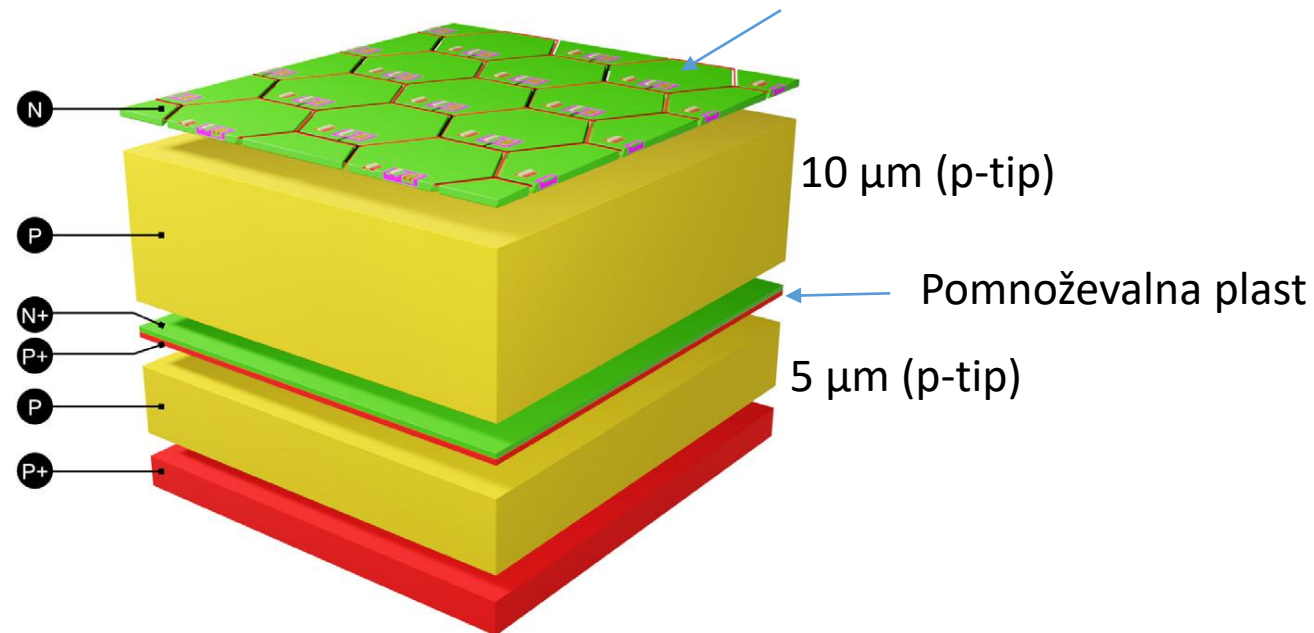
Detektor za FCC_hh bo: **tanek, monolitni, pomnoževanje naboja**

→ **PicoAD** (M.Milanesio et al., Nucl. Instr. and Meth. A1046 (2023) 1687807)

→ trenutno “proof of concept”

→ še zelo dolga pot do uporabe v trkalniku
(sevalne poškodbe,

Zbiralna elektroda + hitri SiGe ojačevalec + CMOS vezja
~ velikost blazinice 100 μm

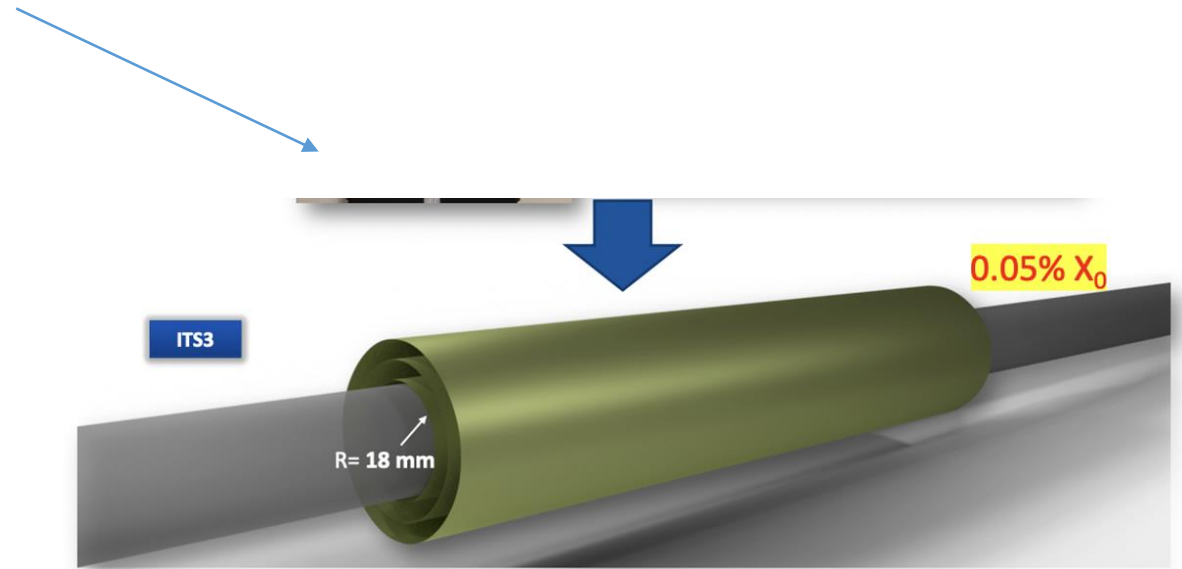


Napetost do 150V!

Detektorji za bodoče trkalnike

Tanki detektorji

- silicij stanjšani na 20 μm lahko zvijemo
 - ➔ monolitni detektorji na 20 μm debelem siliciju naviti okrog cevi trkalnika
 - ➔ razvoj za **ITS3** za eksperiment ALICE za HL-LHC



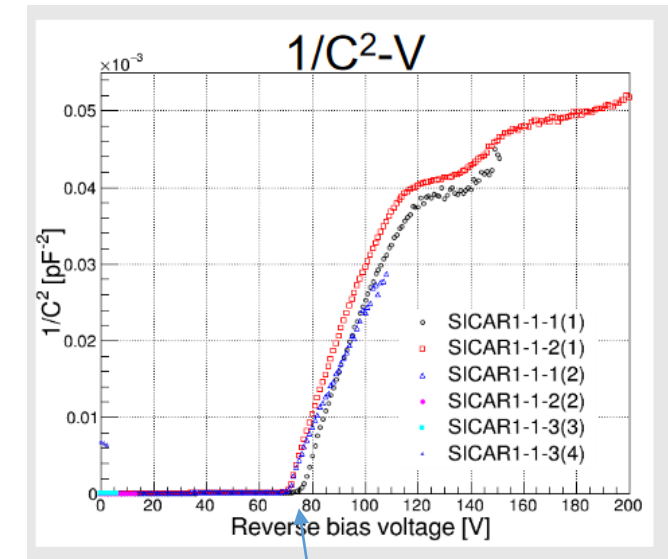
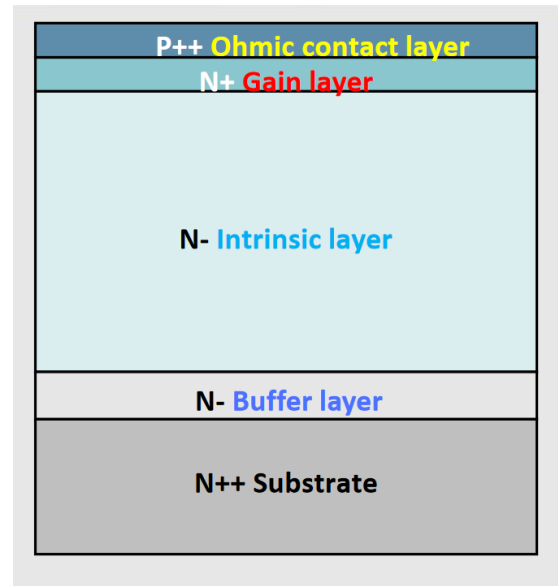
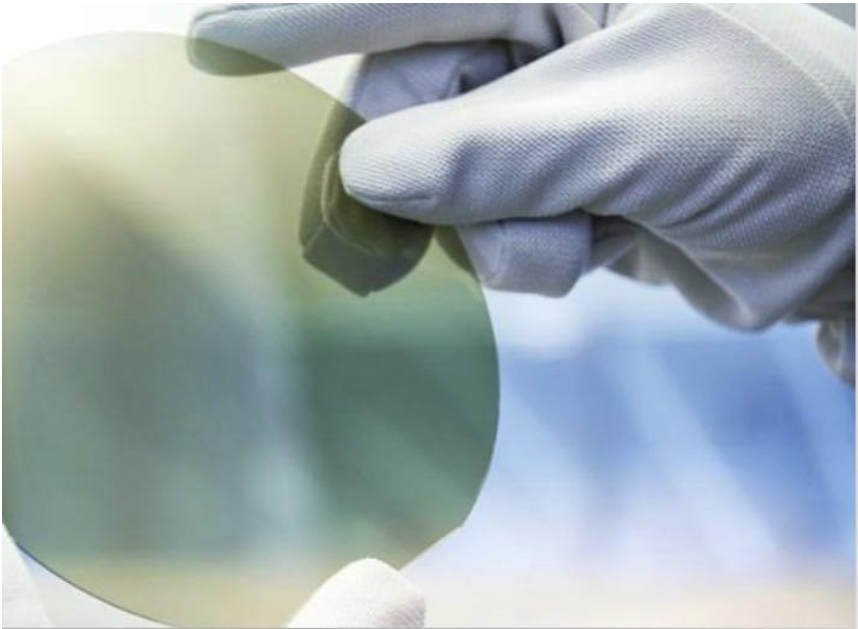
L. Musa (<https://indico.cern.ch/event/755366/contributions/3428151/>)

Detektorji za bodoče trkalnike

SiC - silicijev karbid

- velik $E_g = 3.3$ eV – hlajenje ni potrebno
- tehnologija izdelave čistega SiC hitro napreduje (razvoj ženejo potrebe za e-avtomobile.....)
 - ➔ kmalu na voljo SiC, kjer bo mogoče osiromašiti **150 μm debeline**
 - ➔ prihodnost: morda **SiC LGAD** (pomnoževanje naboja)

Rezina SiC



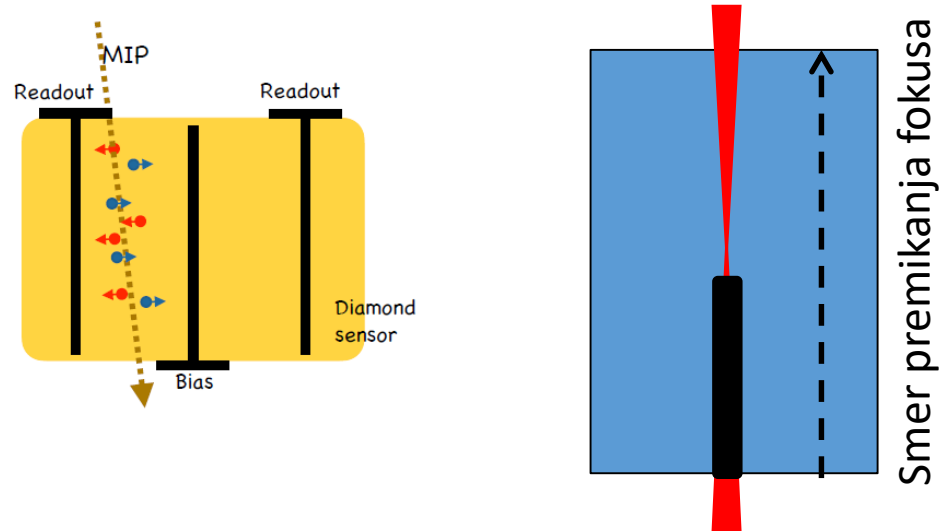
- osiromašenje pomnoževalne plasti
➔ pogoj za pomnoževanje

Detektorji za bodoče trkalnike

Diamant: $E_g = 5.5 \text{ eV}$

→ 3D diamantni detektor

- s premikanjem gorišča laserskega žarka po globini spremenijo diamant v grafit
→ grafit prevoden → elektroda

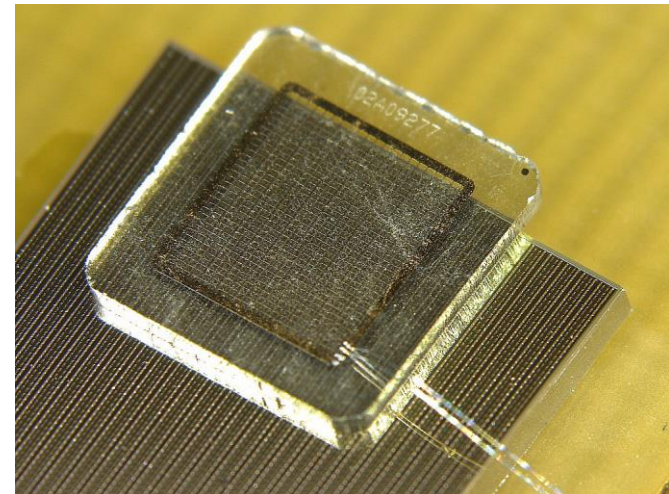
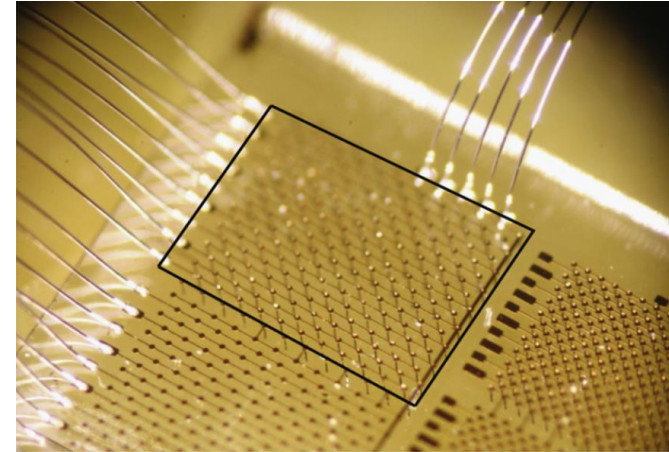


Prva objava:

A. Oh et al., *Diamond & Related Materials* 38 (2013) 9–13.

Soavtorji z F9:

M. Reichmann et al., *Nucl. Instr. and Meth. A* 958 (2020) 162675.



Zaključek

- polprevodniški detektorji se uporabljajo za meritve sledi nabitih delcev
- detektorje postavimo blizu mesta interakcije zato so izpostavljeni sevanju, ki jih poškoduje
- znamo izdelati detektorje, ki bodo lahko delovali v okolju kot ga pričakujemo v eksperimentih na novem pospeševalniku HL-LHC
- skupina z F9 pomembno prispevala k razvoju detektorjev za HL-LHC
- polprevodniški detektorji za prihodnost:
 - dobra časovna ločljivost, monolitni detektorji, (novi materiali)
 - detektorsko tehnologijo za bodoči trkalnik protonov FCC_hh bo potrebno še razviti
 - ➔ do FCC_hh je še (vsaj) 30 let, vendar:
 - razvoj detektorjev napreduje z majhnimi in koraki
 - čas teče hitro
 - ➔ z raziskavami je potrebno začeti zdaj!

Skupina z F9, ki se ukvarja s polprevodniškimi detektorji za nabite delce:

Raziskovalci:

Prof. dr. Vladimir Cindro

Dr. Andrej Gorišek

Dr. Bojan Hiti

Dr. Gregor Kramberger

Dr. Boštjan Maček

Prof. dr. Marko Mikuž

Doc. dr. Igor Mandić

Prof. dr. Marko Zavrtanik

MR-ji:

Jernej Debevc

Alissa Howard

Miha Mali

Tehnična podpora:

Jure Eržen

Erik Margan

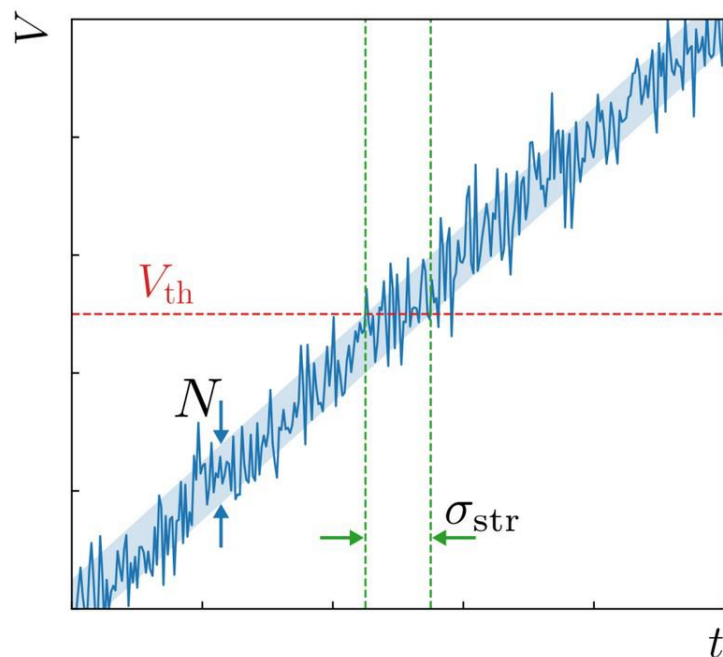
Brigita Novak

Viri:

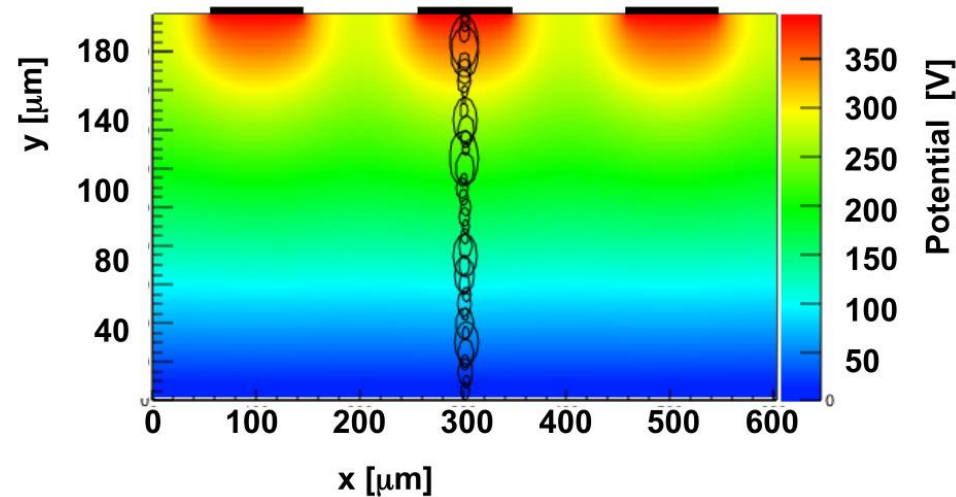
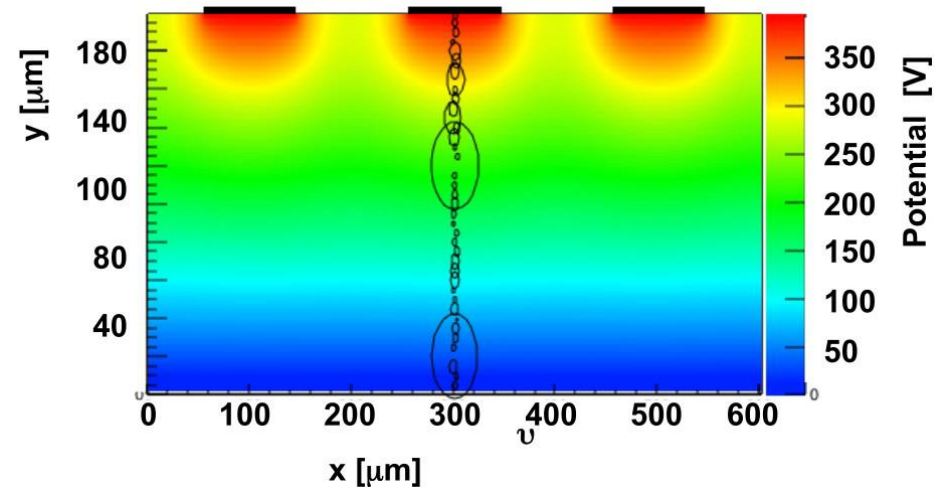
Dodatni

HL-LHC

Časovna ločljivost:



- Šum N povzroči časovno stresanje časa prehoda σ_{str} preko praga V_{th}
 - večja strmina naraščanja pri istem šumu zmanjša časovno stresanje
 - čim višji signal



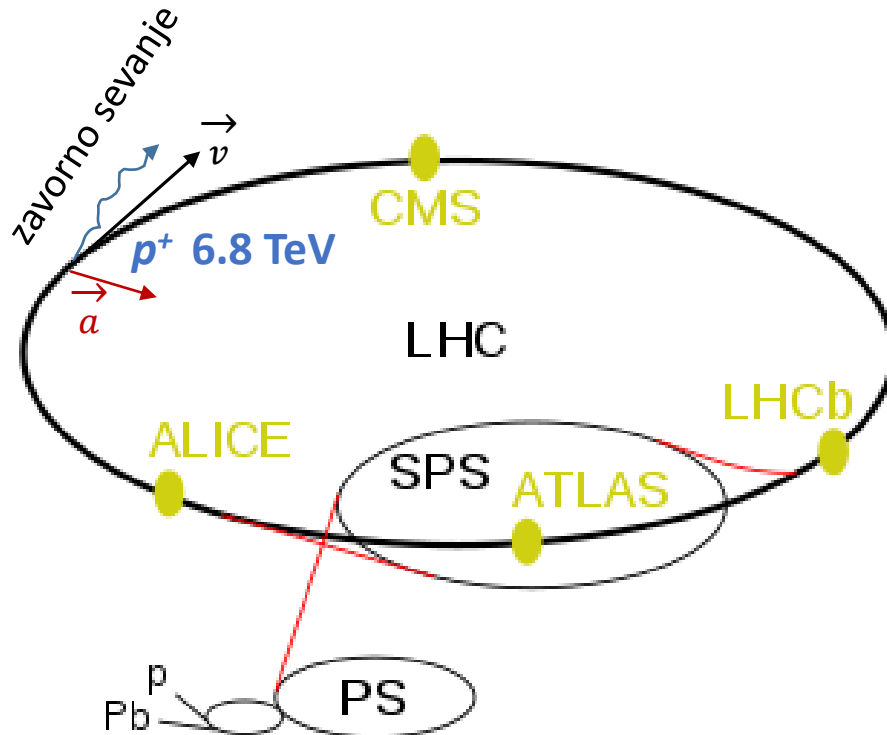
- Fluktuacije porazdelitve sproščene naboja pri prehodu delca skozi detektor vplivajo na časovno obliko signala
 - čim tanjši detektor

Iskanje pojavov nove fizike

- opazovanje interakcij delcev pri čim višji energiji

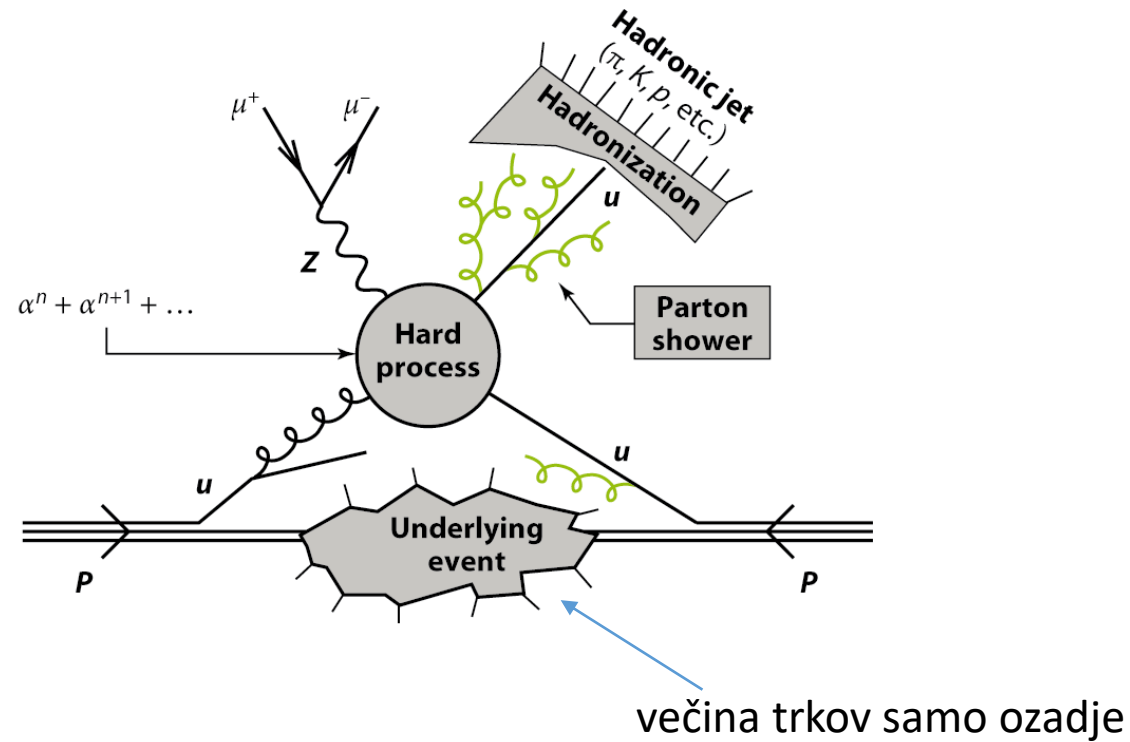
→ trkalnik protonov

- zavorno sevanje → energijski tok, ki ga delec seva pri kroženju : $P \sim aE^4/m^4$
- **v krožnih trkalnikih moramo imeti delce z veliko maso, če želimo doseči visoke energije**
→ protoni (masa protona = 2000 x masa elektrona)



Trki protonov

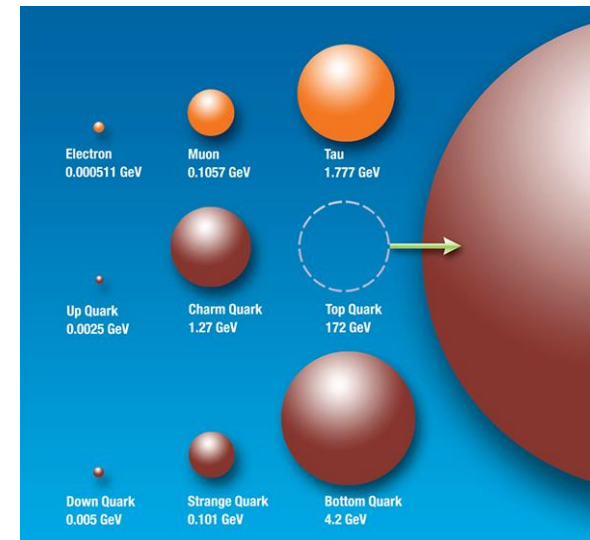
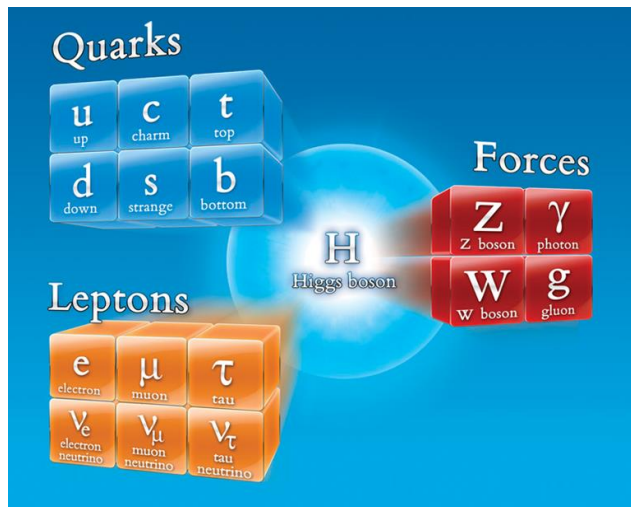
- protoni so **sestavljani delci** (kvarki **uud** povezani z **gluoni**)
 - samo del energije protonov ($2 \times 6.8 \text{ TeV}$) na voljo za interakcije osnovnih delcev,
 - zanimivi procesi so **redki**, spremlja jih veliko ozadja
 - pri veliki večini trkov “nezanimivi” procesi
 - veliko število delcev preleti detektorje blizu interakcijske točke → **sevalne poškodbe**



Fizika osnovnih delcev

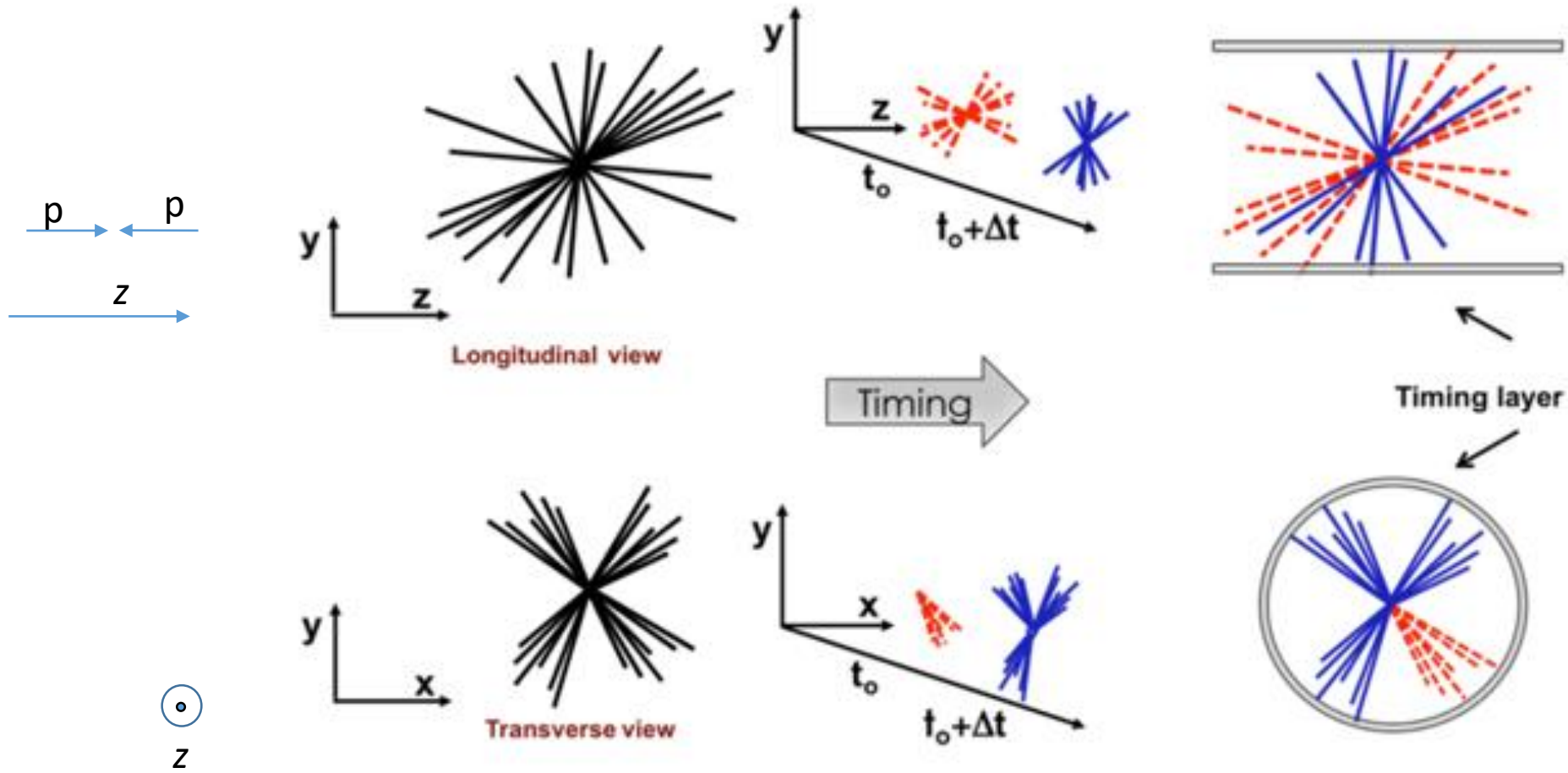
- Standardni Model elektrošibke in močne interakcije opisuje zgradbo snovi in sile, ki delujejo med osnovnimi delci
 - **izjemno dobro opiše pojave, ki jih preučujemo na pospeševalnikih**
- **vendar pušča še dosti neodgovorjenih vprašanj npr.:**
 - zakaj ravno 3 generacije kvarkov in leptonov in zakaj so si med seboj tako različne
- **pojavov, ki bi pokazali, kako odgovoriti na prejšnja vprašanja še nismo opazili, ker:**
 - zelo malo vplivajo na pojave v fiziki delcev, ki jih lahko opazujemo
 - so izjemno redki
 - **dogajajo se pri interakcijah delcev z zelo visokimi energijami**

} sicer bi jih že opazili



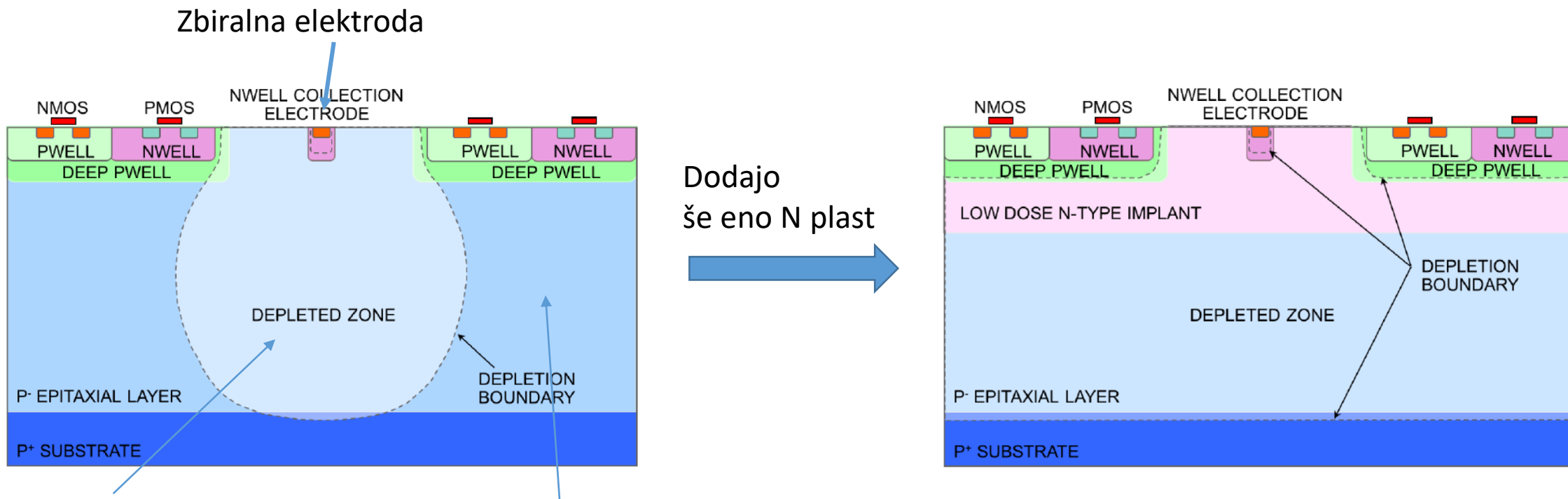
HL-LHC

- Podatek o času pomaga pri rekonstrukcij



DMAPS

- podobno kot CMOS senzor za svetlobo v kamerah na telefonih vendar:
→ **detektor mora biti učinkovit po vsej površini (~ 100% fill factor)**



Osiromašeno, E polje

- **hitro zbiranje**,
→ prispeva k signalu tudi če poškodovano od sevanja

Ni osiromašeno

- **počasno zbiranje** (difuzija)
→ ne prispeva k signalu če poškodovano s sevanjem

Povsod osiromašeno

- vendar potrebuje še dodatne modifikacije, da dobro deluje po obsevanju

Testni žarek v CERNu

