

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO  
ODDELEK ZA FIZIKO

Seminar

---

**Neposredna klasifikacija  
za iskanje novih procesov  
v fiziki osnovnih delcev**

---

AVTOR: Elijan Mastnak  
MENTOR: prof. dr. Borut Paul Kerševan

# Kaj je klasifikacija delcev?

## Klasifikacija

Identifikacija *produktov* trka med dvema visoko-energetskima delcema

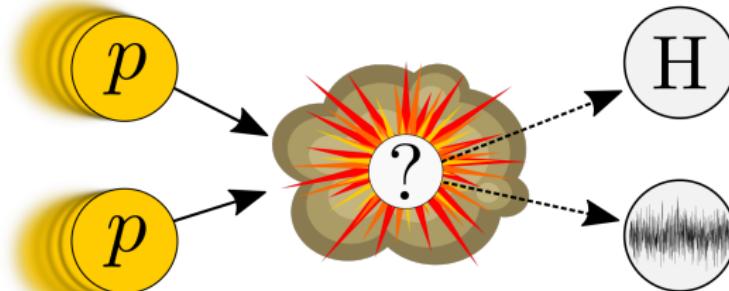
# Kaj je klasifikacija delcev?

## Klasifikacija

Identifikacija *produktov* trka med dvema visoko-energetskima delcema

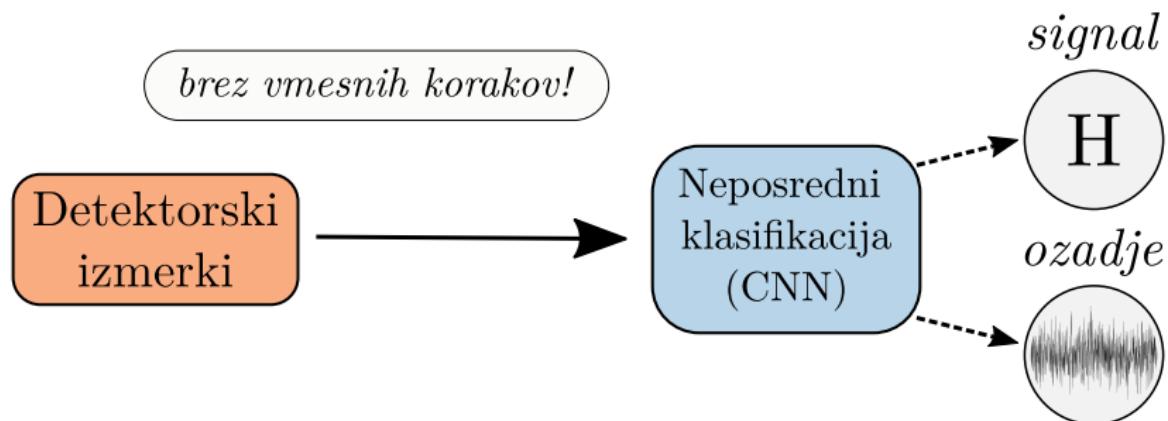
Nas bo zanimala *binarna* klasifikacija Higgsovega bozona. Produkte trkov razvrstimo v kategoriji...

- (a) Higgsov bozon (*signal*)
- (b) karkoli drugega (*ozadje*)



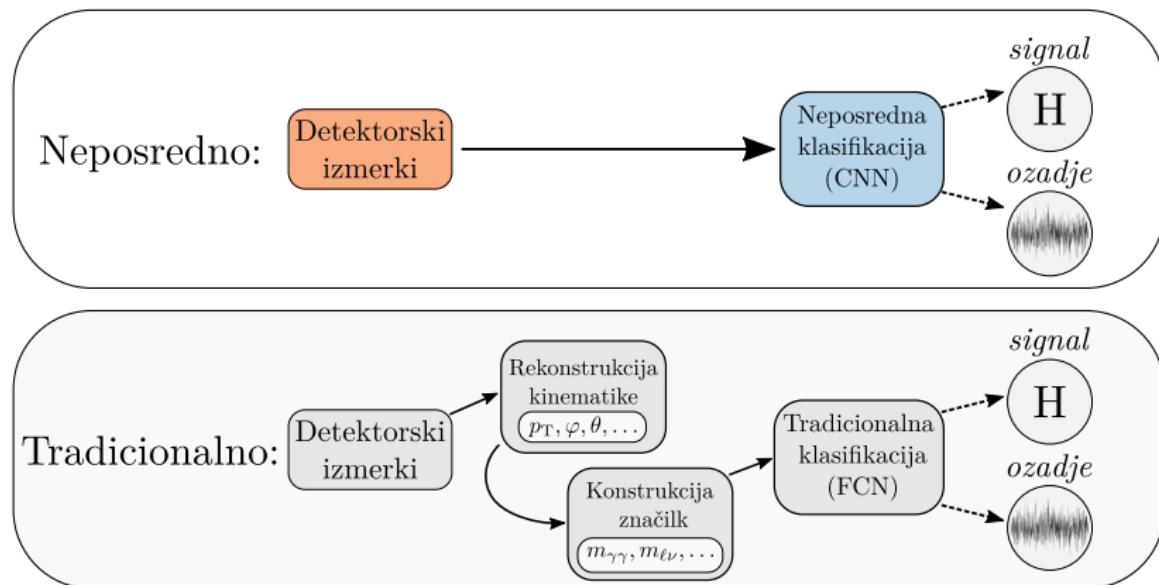
# Neposredna klasifikacija

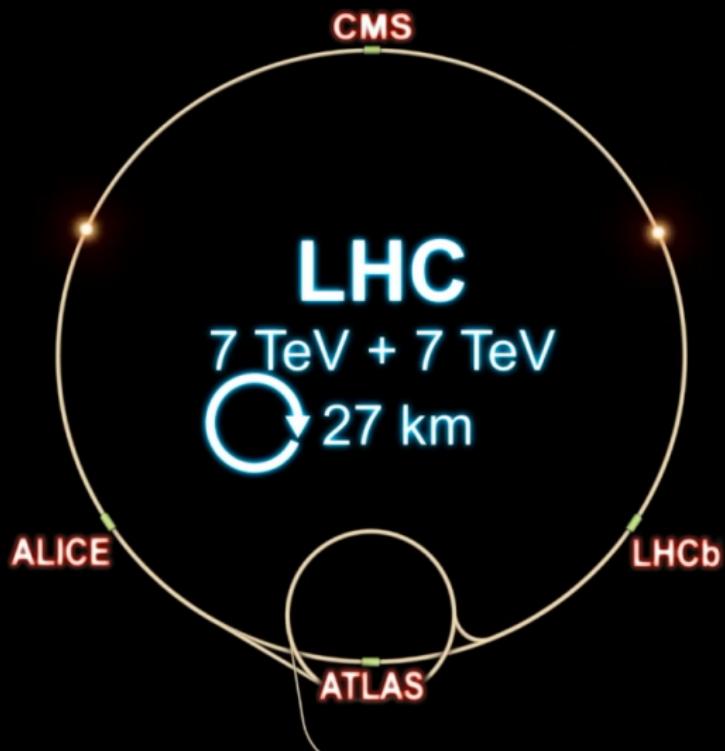
- ▶ Neposredno uporablja detektorske meritve



# Neposredna klasifikacija

- ▶ Neposredno uporablja detektorske meritve
- ▶ Odpravi zahtevne vmesne korake

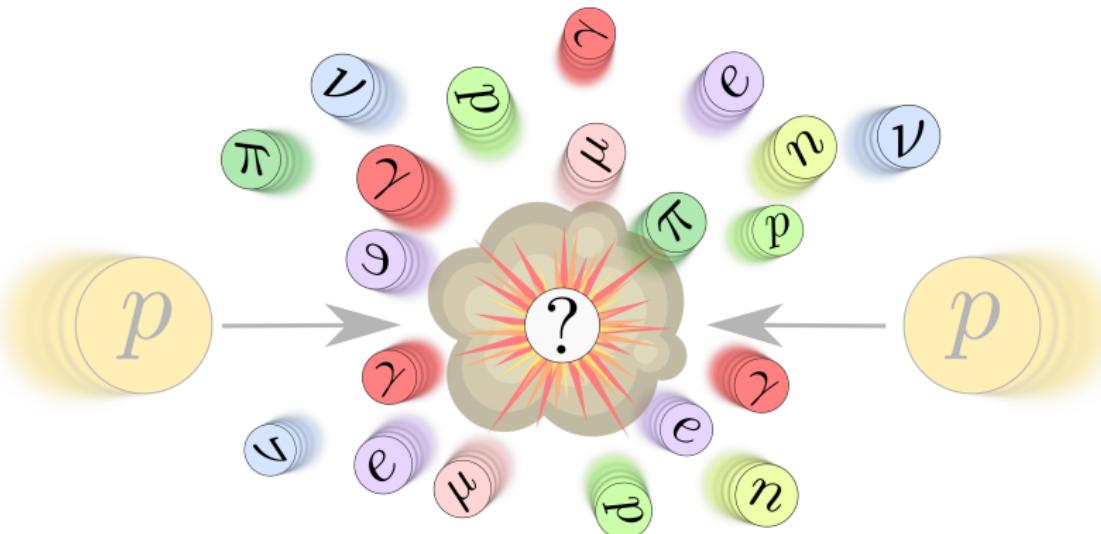




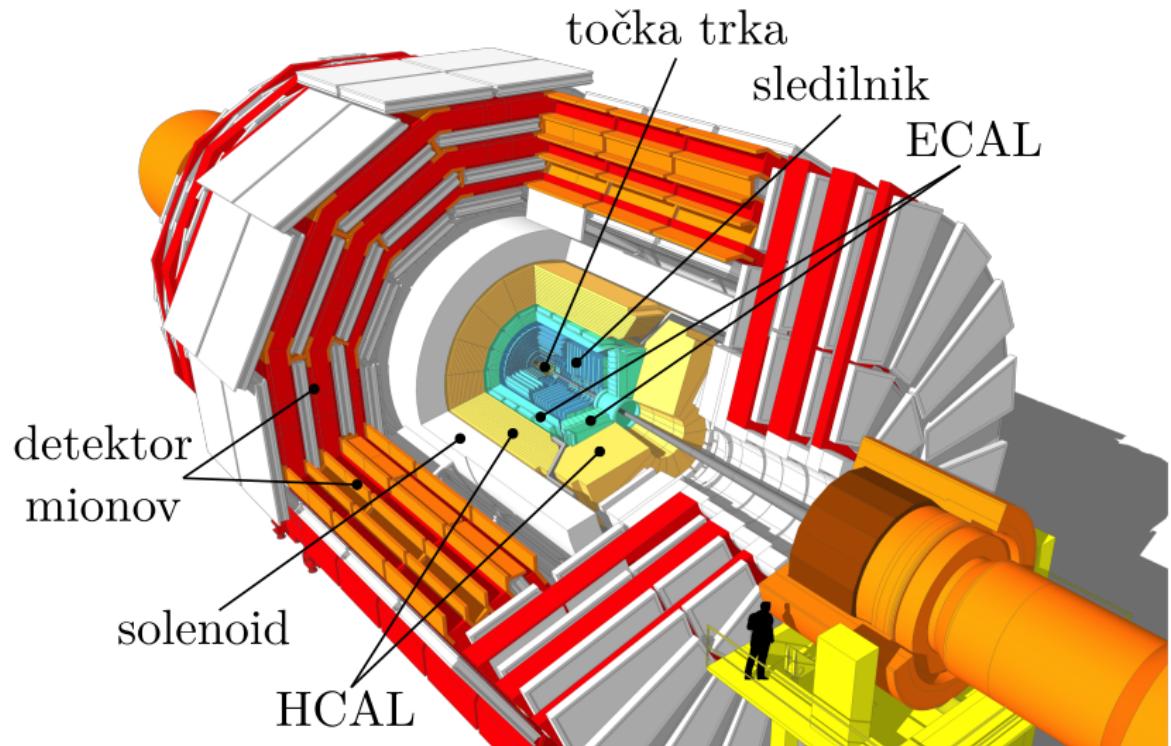
Animacija: trk protonov v detektorju ATLAS [4]

# Ključna omejitev

- ▶ Zanimivi delci *zelo* hitro razpadejo ( $\tau_H \sim 10^{-22}$  s)
- ▶ *Neposredna detekcija ni mogoča*
- ▶ Vidimo le razpadno karakteristiko

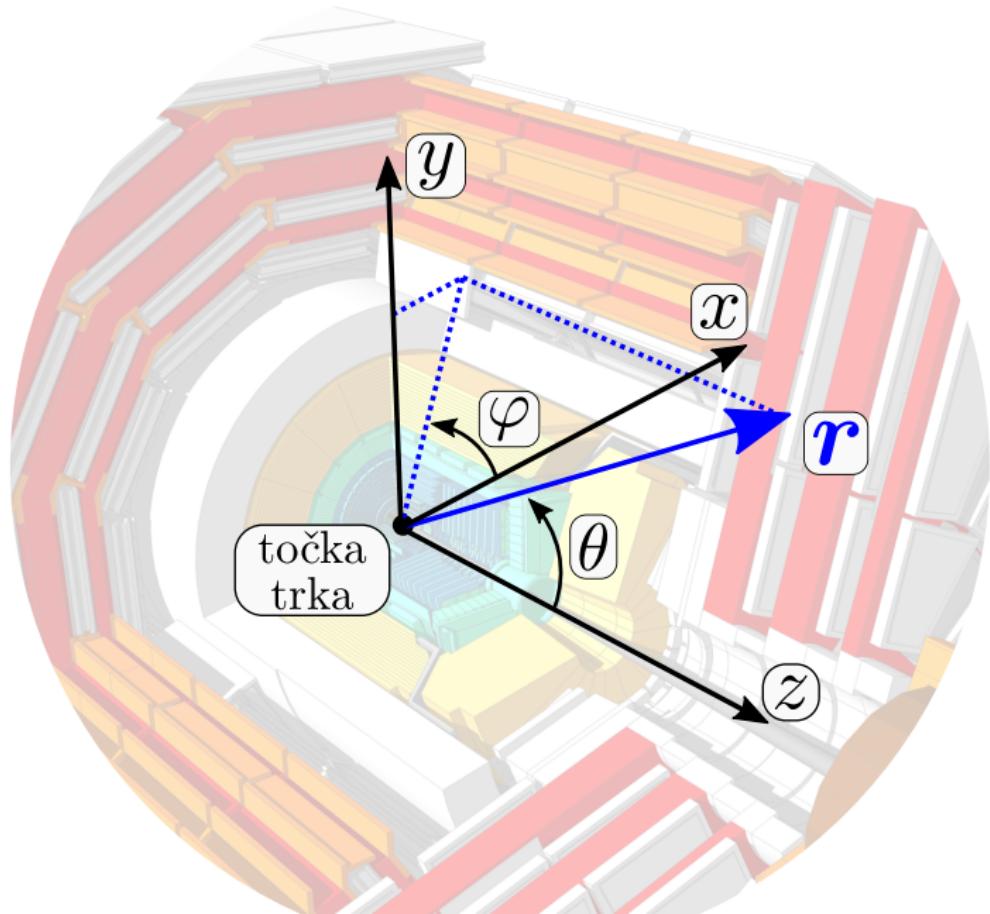


# Compact Muon Solenoid



vir: [7]

# Koordinatni sistem CMS



# Sledilnik: merjenje trajektorije

## Fizikalni principi

- ▶ Zaporno-vezan polprevodnik
- ▶ Nabiti delec preleti polprevodnik
- ▶ Nastane par elektron-vrzel
- ▶ Elektron in vrzel povzročita merljivi tokovni sunek

# Sledilnik: merjenje trajektorije

## Fizikalni principi

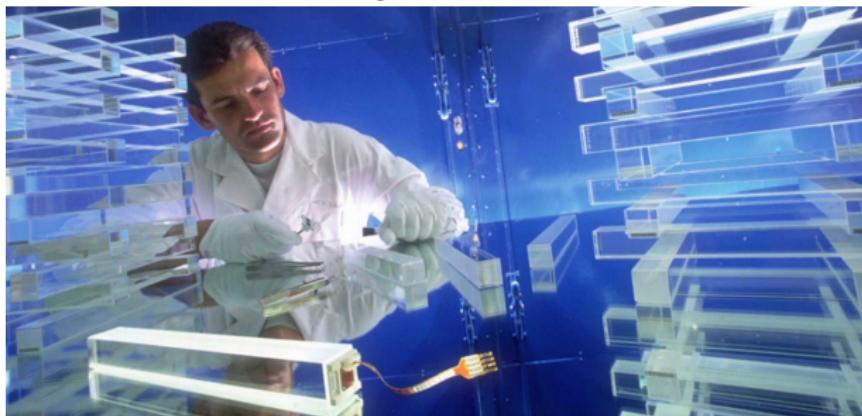
- ▶ Zaporno-vezan polprevodnik
- ▶ Nabiti delec preleti polprevodnik
- ▶ Nastane par elektron-vrzel
- ▶ Elektron in vrzel povzročita merljivi tokovni sunek

## Za občutek...

- ▶ Dimenzijs  $\sim 10$  to  $100 \mu\text{m}$
- ▶  $\sim 75$  milijon “read-out” kanalov

# Elektromagnetni kalorimeter (ECAL)

- ▶ Meri energijo delcev
- ▶ Scintilatorji iz  $\text{PbWO}_4$
- ▶ Dimenziije  $\sim 2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$
- ▶  $\sim 75\,000$  scintilacijskih kristalov



vir: [2]

# Fizikalni princip ECAL-a

- Vpadni delec povzročí *EM pljusk*

# Fizikalni princip ECAL-a

- ▶ Vpadni delec povzročí *EM pljusk*
- ▶ Pljusk vzbudi  $\text{PbWO}_4$  scintilator

# Fizikalni princip ECAL-a

- ▶ Vpadni delec povzročí *EM pljusk*
- ▶ Pljusk vzbudi  $\text{PbWO}_4$  scintilator
- ▶ Scintilator emitira *scintilacijske fotone*

# Fizikalni princip ECAL-a

- ▶ Vpadni delec povzroči *EM pljusk*
- ▶ Pljusk vzbudi  $\text{PbWO}_4$  scintilator
- ▶ Scintilator emitira *scintilacijske fotone*
- ▶ Fotoni sprožijo *fotoelektrone* v polprevodniškim fotodetektorju

# Fizikalni princip ECAL-a

- ▶ Vpadni delec povzroči *EM pljusk*
- ▶ Pljusk vzbudi  $\text{PbWO}_4$  scintilator
- ▶ Scintilator emitira *scintilacijske fotone*
- ▶ Fotoni sprožijo *fotoelektrone* v polprevodniškim fotodetektorju
- ▶ Fotodetektor zazna tokovni sunek

$$I_0 \propto N_{\text{e}^-} \propto N_\gamma \propto E_{\text{dep}}$$

# Hadronski Kalorimeter (HCAL)

- ▶ Meri energijo hadronov
- ▶ Medeninasti absorber in plastični scintilatorji
- ▶ Fizikalni principi analogi ECAL-u

# Hadronski Kalorimeter (HCAL)

- ▶ Meri energijo hadronov
- ▶ Medeninasti absorber in plastični scintilatorji
- ▶ Fizikalni principi analogi ECAL-u

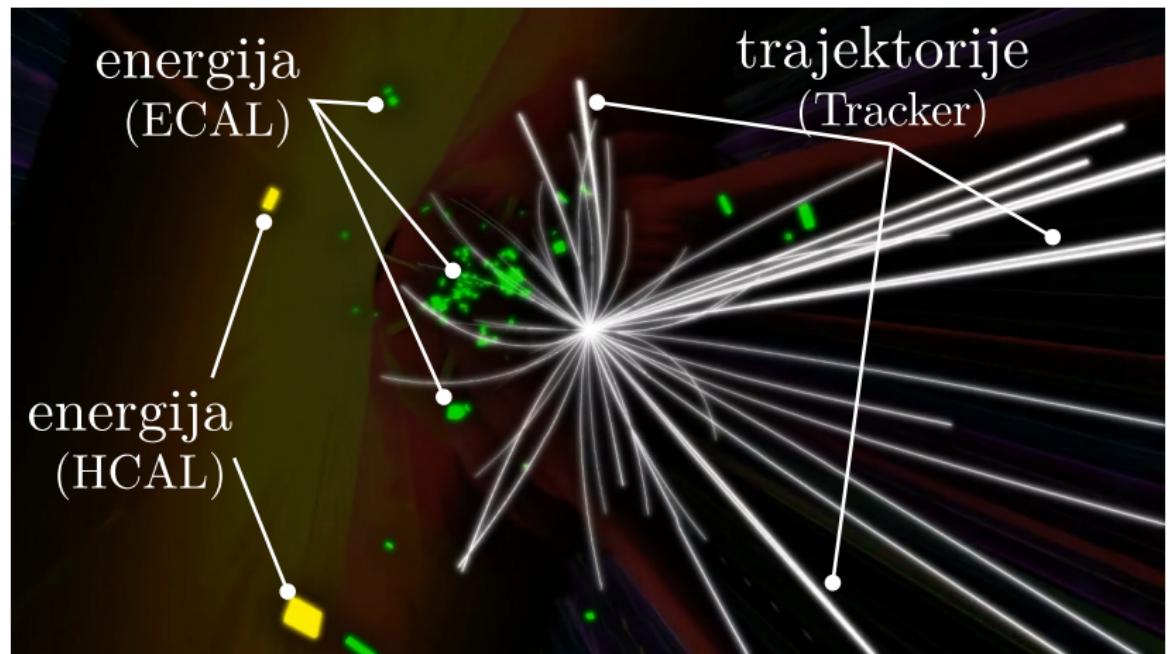
Zanimivost: uporaba ruskih granat iz WWII

vir: [3]

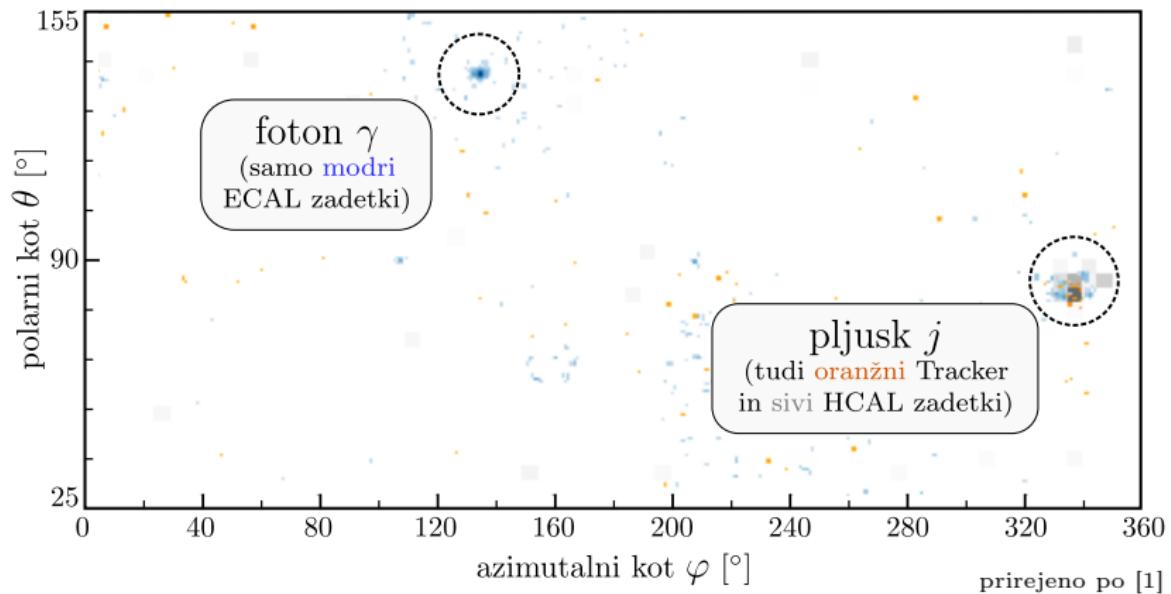


# Interpretacija detektorskih meritov

Spomnimo se, kako izgledajo detektorske meritve...



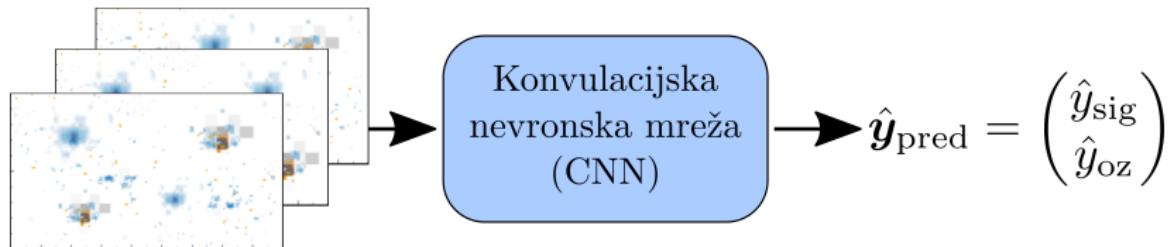
# Interpretacija detektorskih meritev



- ▶ mreža pixelov (analogno sliki)
- ▶ 2 prostorski dimenziji ( $\varphi, \theta$ )
- ▶ 3 detektorski kanali (Tracker, ECAL, HCAL)

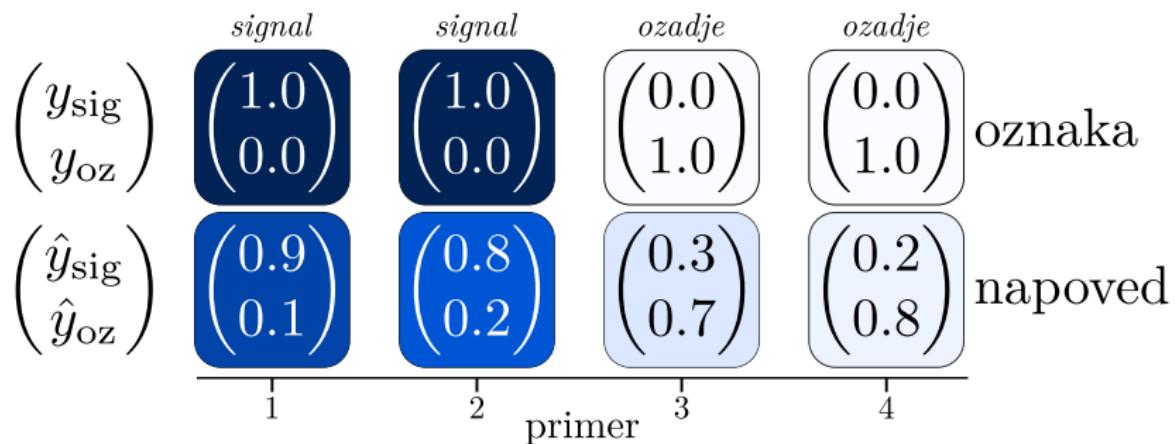
# Neposredna klasifikacija

- ▶ Vhod: detektorske meritve (“slike trka”)
- ▶ Izhod: *klasifikacijska napoved*  $\hat{\mathbf{y}}_{\text{pred}}$



# Interpretacija napovedi mreže

- ▶ Pravilni rezultat  $\mathbf{y} = \begin{pmatrix} y_{\text{sig}} \\ y_{\text{oz}} \end{pmatrix}$  (iz simulacije)
- ▶ Napoved:  $\hat{\mathbf{y}} = \begin{pmatrix} \hat{y}_{\text{sig}} \\ \hat{y}_{\text{oz}} \end{pmatrix}$
- ▶ Kategorije opišemo z vrednostmi 1 in 0

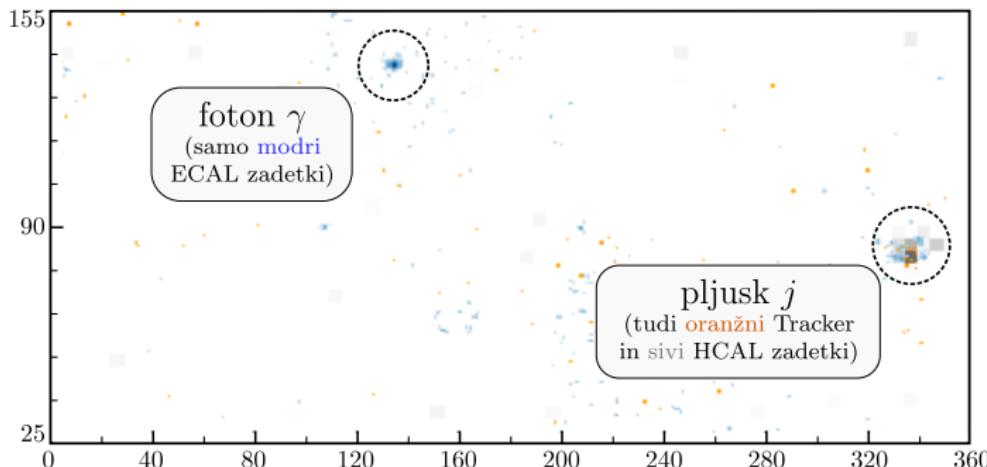


# Motivacija za konvolucijske mreže

Lastnosti vhodnih podatkov...

- ▶ več-dimenzionalnih nabori (“arrays”)
- ▶ ena kanalna os za različne pod-detektorje
- ▶ dve prostorski osi za koordinati  $\varphi$  in  $\theta$

*Prostorska struktura vsebuje fizikalno informacijo!*



# Motivacija za konvolucijske mreže

## Cilj konvolucijske mreže

Ohraniti in izkoristiti informacijo, vsebovana v *prostorski strukturi* vhodnih podatkov.

# Motivacija za konvolucijske mreže

## Cilj konvolucijske mreže

Ohraniti in izkoristiti informacijo, vsebovana v *prostorski strukturi* vhodnih podatkov...

...kar klasična nevronska mreža, ki zahteva 1D vhodne podatke, ni sposobna narediti.

# Motivacija za konvolucijske mreže

## Cilj konvolucijske mreže

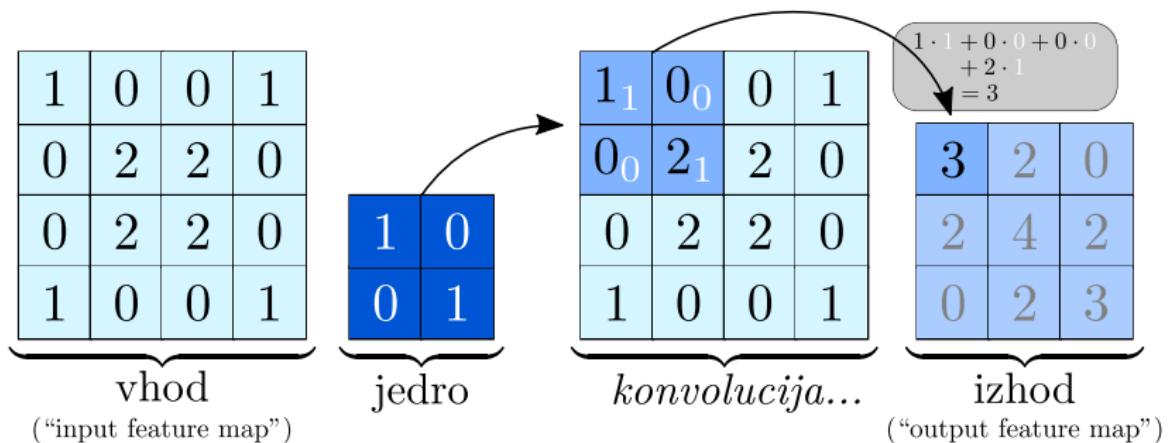
Ohraniti in izkoristiti informacijo, vsebovana v *prostorski strukturi* vhodnih podatkov...

...kar klasična nevronska mreža, ki zahteva 1D vhodne podatke, ni sposobna narediti.

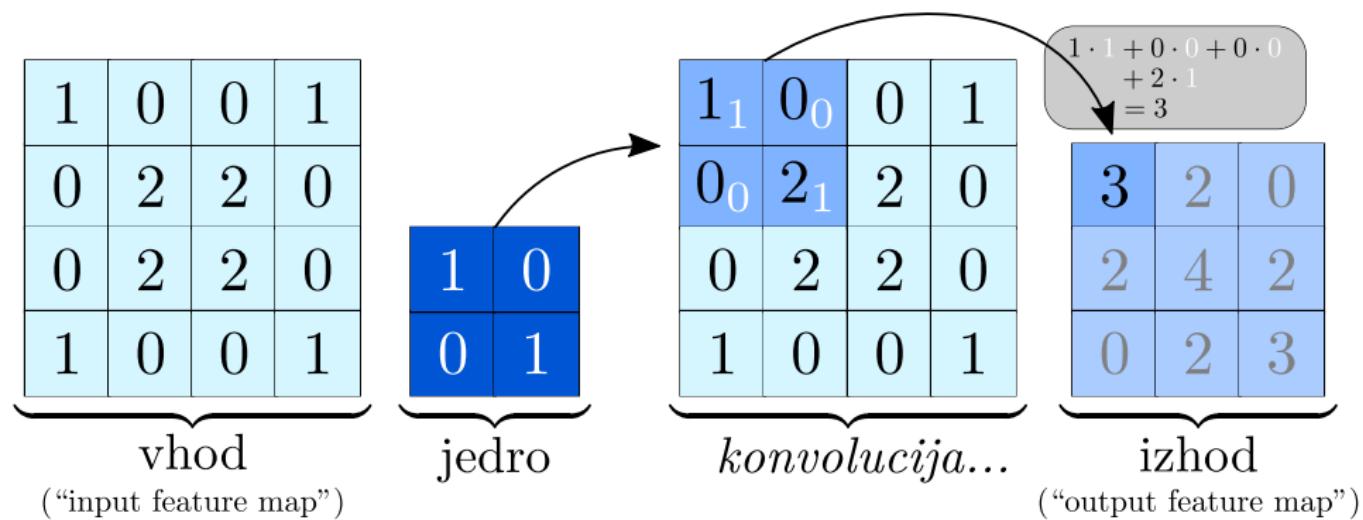
Potrebujemo torej operacijo, ki upošteva prostorsko strukturo vhodnih detektorskih podatkov!

# Diskretna konvolucija

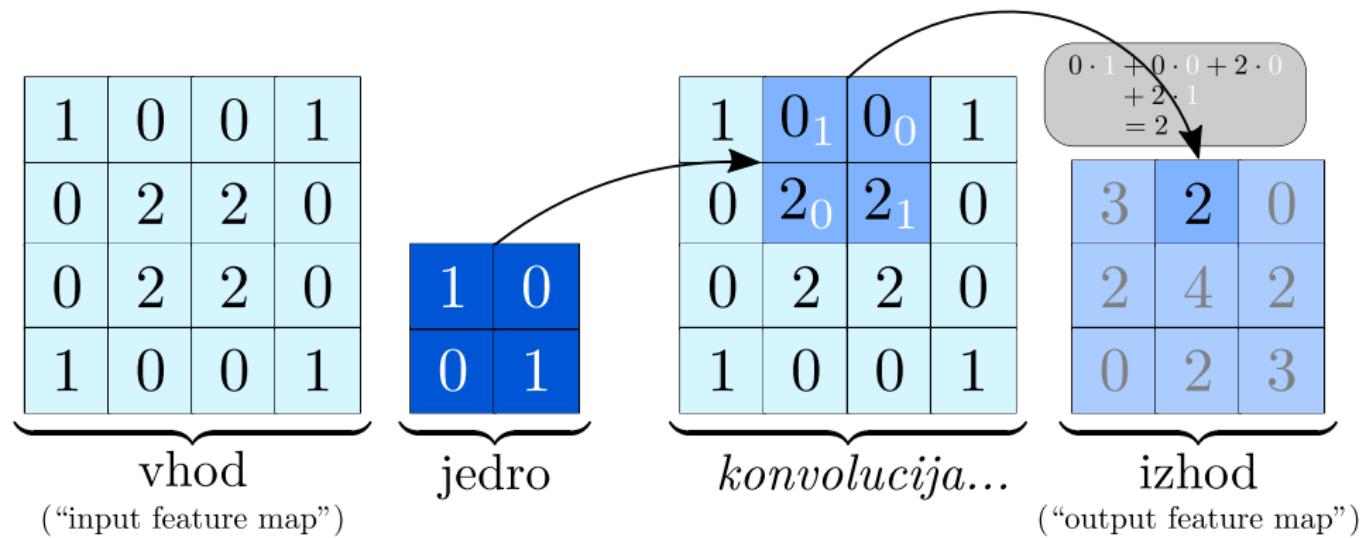
Konvoluiramo sliko z konvolucijskim jedrom (ang. “kernel”)



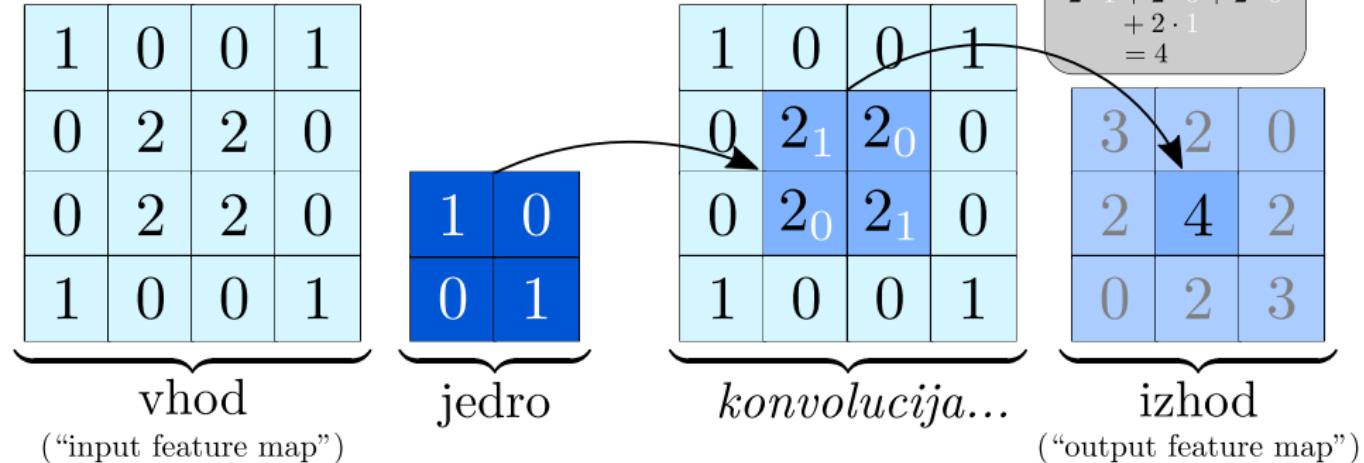
# Zgledi: diskretna konvolucija



# Zgledi: diskretna konvolucija



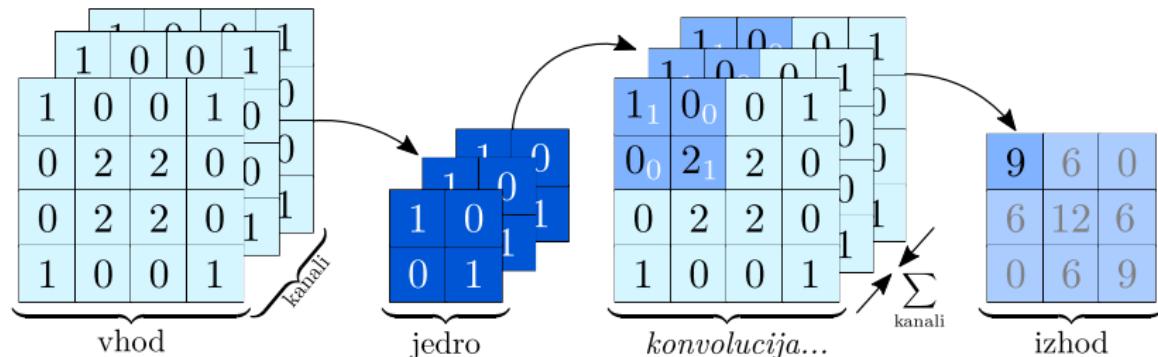
# Zgledi: diskretna konvolucija



# Posplošitve...

## Več-kanalne slike

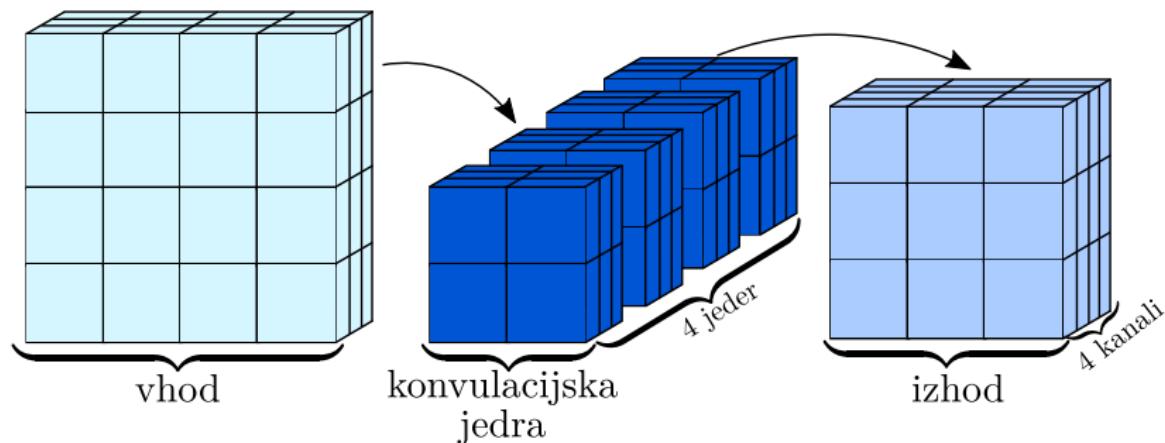
- ▶ Vhodne slike (3D) imajo več kanalov...
- ▶ Torej uporabimo več-kanalno (3D) jedro!
- ▶ Seštejemo prek kanalne osi, da dobimo 2D izhod



# Posplošitve...

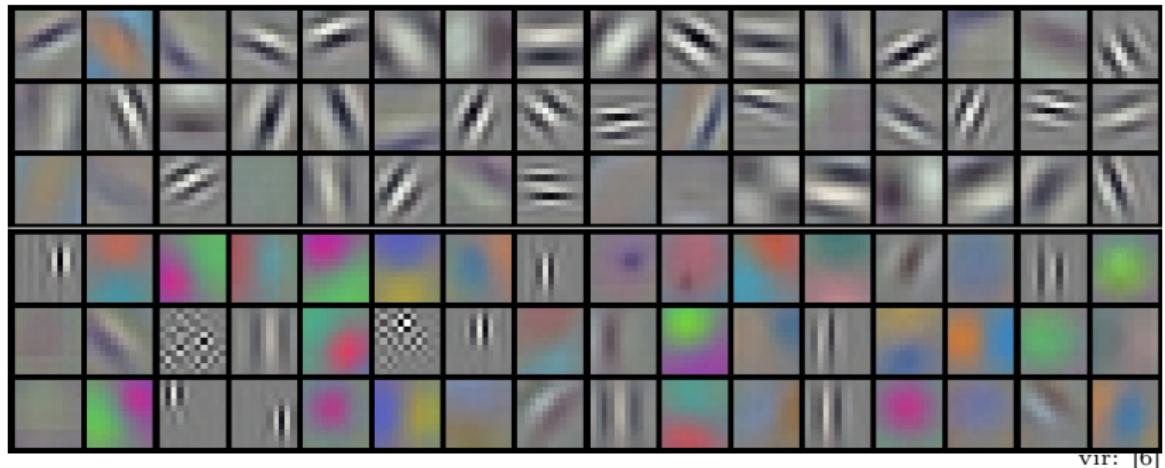
## Več konvolucijskih jeder

- ▶ Vsako jedro zazna eno znacilko  
(robovi, kontrastne barve, geometrijski liki...)
- ▶ Izhod je 3D



# Konkretni zgledi jeder

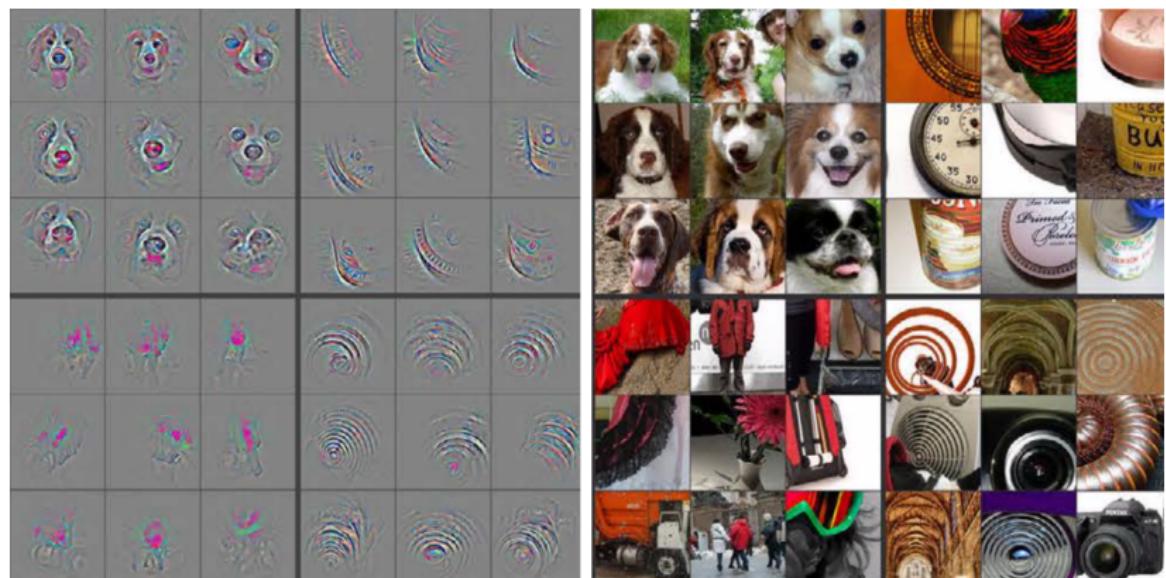
Zaznajo robove, kontrastne barve, druge vzorce...



vir: [6]

# Konkretni zgledi izhodnih preslikav

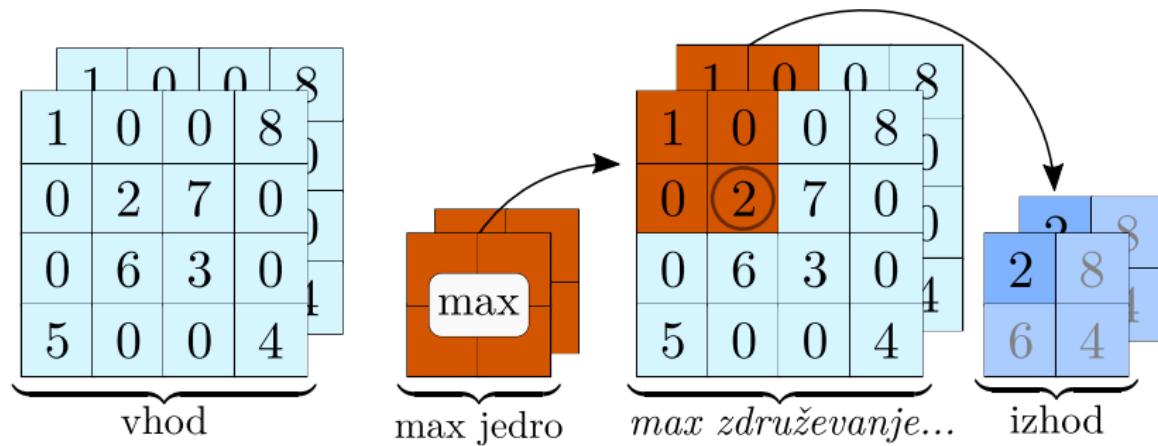
Zgledi slik, predelanih z konvolucijo:



vir: [8]

# (Max) Združevanje (ang. “pooling”)

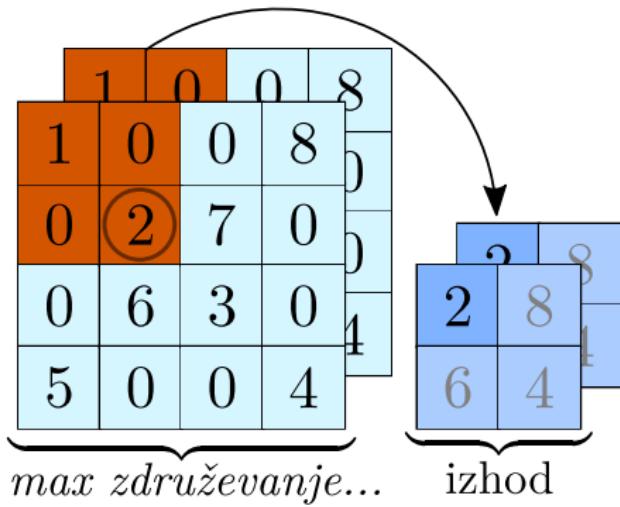
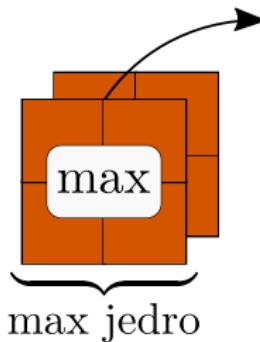
Najbolj jasno na zgledu...



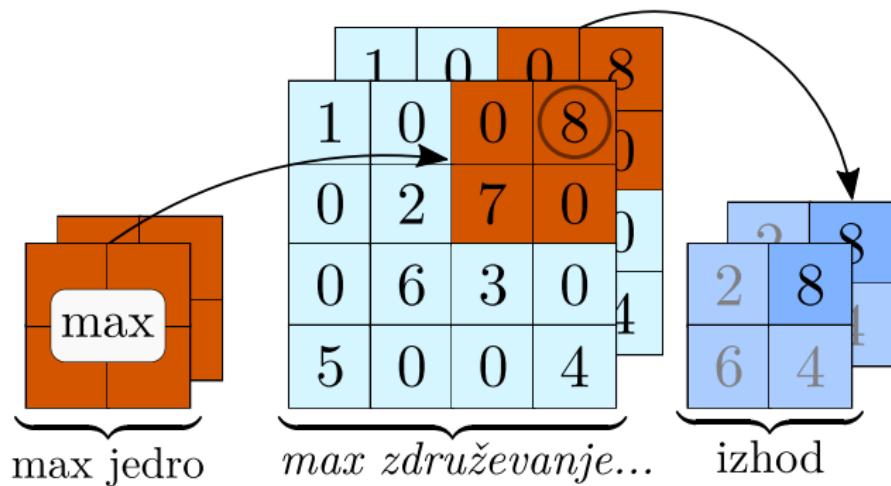
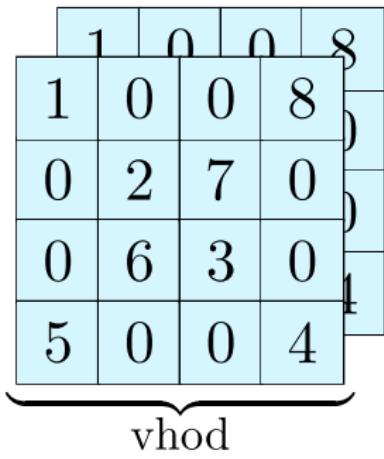
# Zgledi: max združevanje

1	0	0	8	
1	0	0	8	0
0	2	7	0	0
0	6	3	0	4
5	0	0	4	

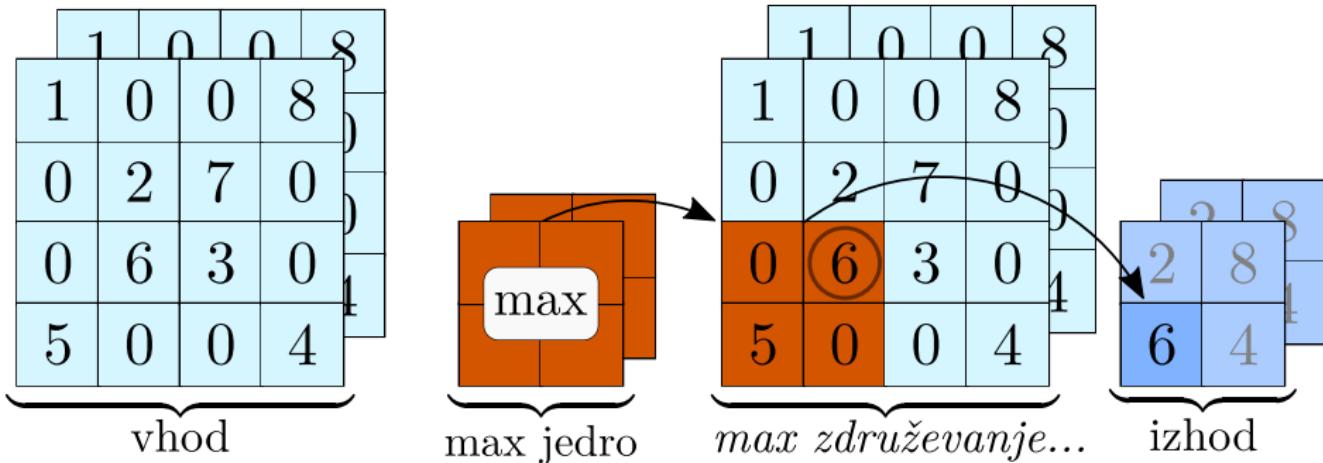
vhod



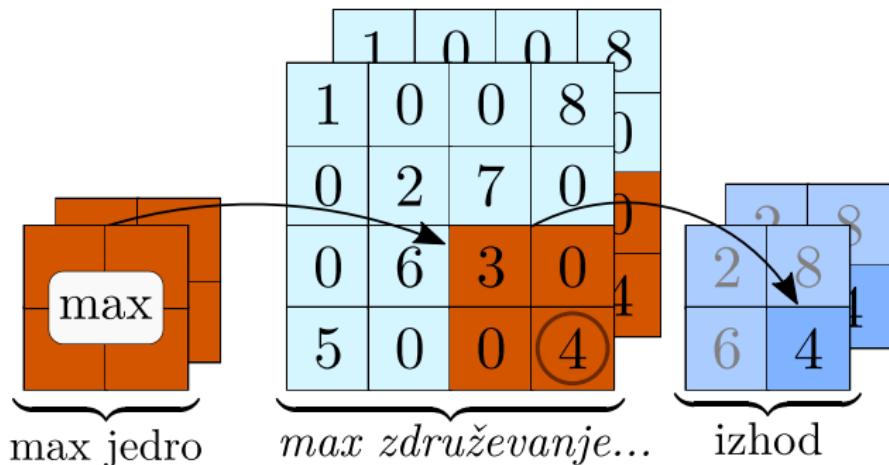
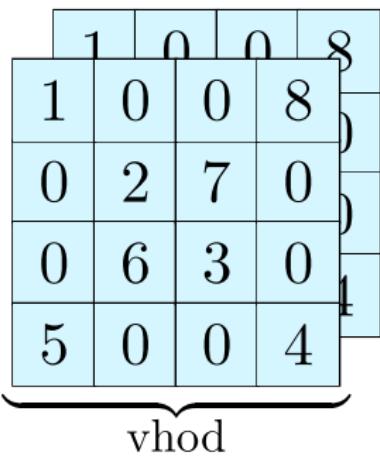
# Zgledi: max združevanje



# Zgledi: max združevanje



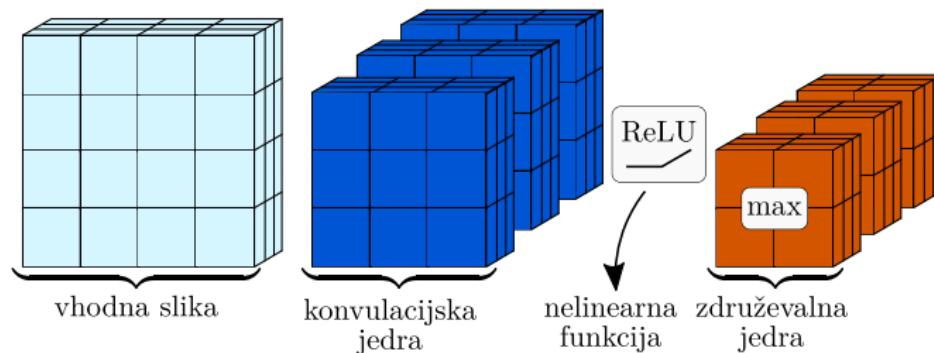
# Zgledi: max združevanje



# Struktura mreže CNN

Tipično zaporedje operacij:

- (a) konvolucija
- (b) nelinearna funkcija
- (c) združevanje

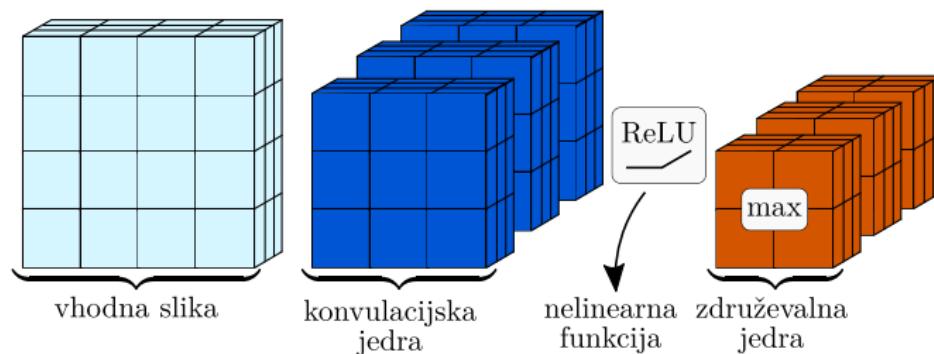


# Struktura mreže CNN

Tipično zaporedje operacij:

- (a) konvolucija
- (b) nelinearna funkcija
- (c) združevanje

Ponavljamo... (ni prikazano)



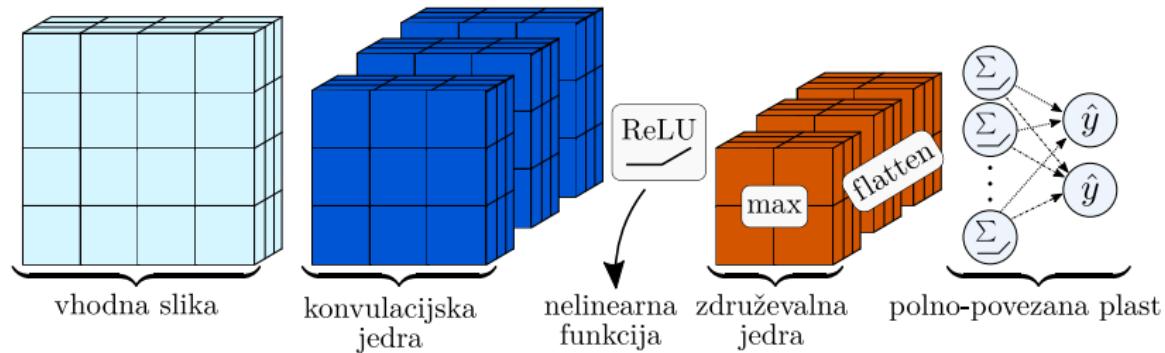
# Struktura mreže CNN

Tipično zaporedje operacij:

- (a) konvolucija
- (b) nelinearna funkcija
- (c) združevanje

Ponavljamo... (ni prikazano)

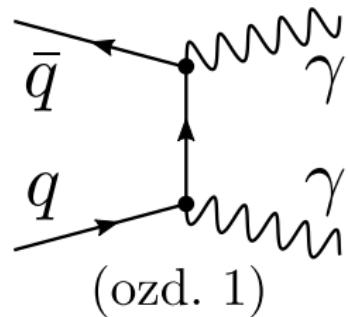
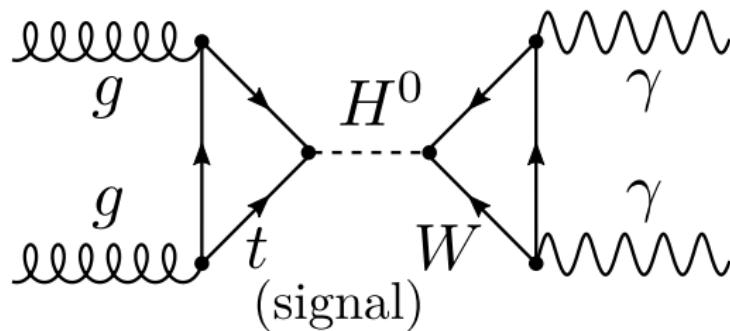
Sploščimo; uporabimo FCN plast za napoved



# Neposredna klasifikacija v praksi

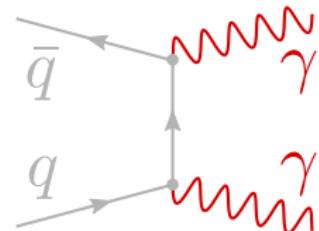
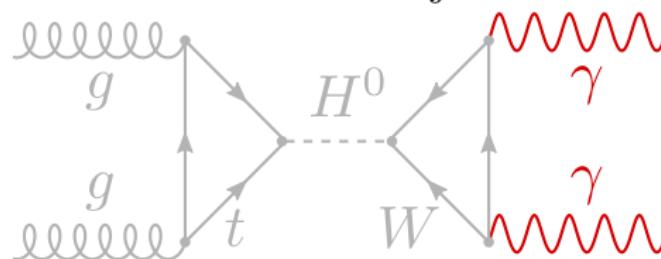
Andrews et al. *End-to-End Physics Event Classification with CMS Open Data*. 2020. [1]

- ▶ Klasifikacija Higgsovega bozona (CMS)
- ▶ Signal:  $gg \rightarrow H^0 \rightarrow \gamma\gamma$
- ▶ Ozadje 1:  $q\bar{q} \rightarrow \gamma\gamma$
- ▶ Ozadje 2:  $q\bar{q} \rightarrow \gamma j$



# Izzivi pri tej študiji

(a) nereducibilno ozadje



za osvežitev...

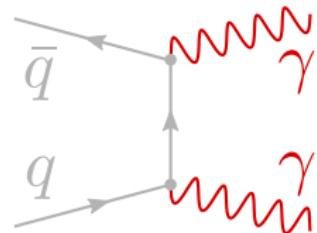
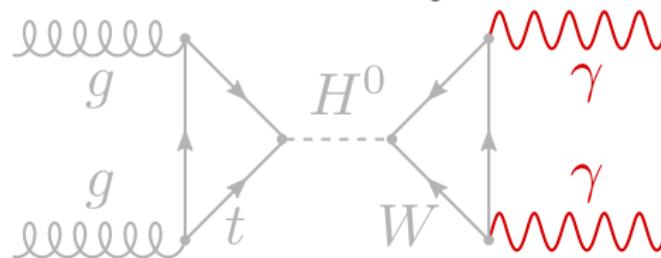
sig:  $gg \rightarrow H^0 \rightarrow \gamma\gamma$

ozd 1:  $q\bar{q} \rightarrow \gamma\gamma$

ozd 2:  $q\bar{q} \rightarrow \gamma j$

# Izzivi pri tej študiji

(a) nereducibilno ozadje



(b) neločljivi razpadni produkti

$$\gamma j \approx \gamma\gamma \implies \text{ozd 1} \approx \text{ozd 2} \approx \text{sig}$$

za osvežitev...

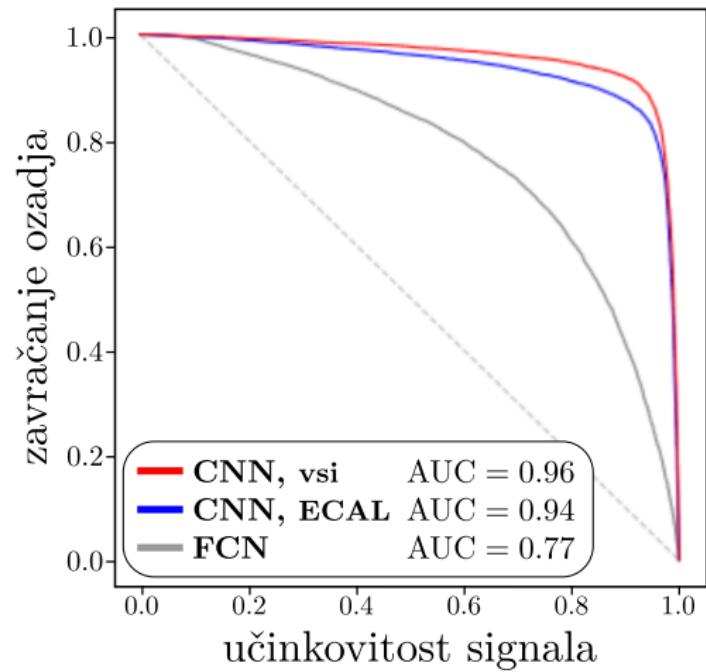
$$\text{sig: } gg \rightarrow H^0 \rightarrow \gamma\gamma \quad \text{ozd 1: } q\bar{q} \rightarrow \gamma\gamma \quad \text{ozd 2: } q\bar{q} \rightarrow \gamma j$$

# Zgled: Klasifikacija foton-pljusk

Naloga: klasificirati  $gg \rightarrow H^0 \rightarrow \gamma\gamma$  in  $q\bar{q} \rightarrow \gamma j$

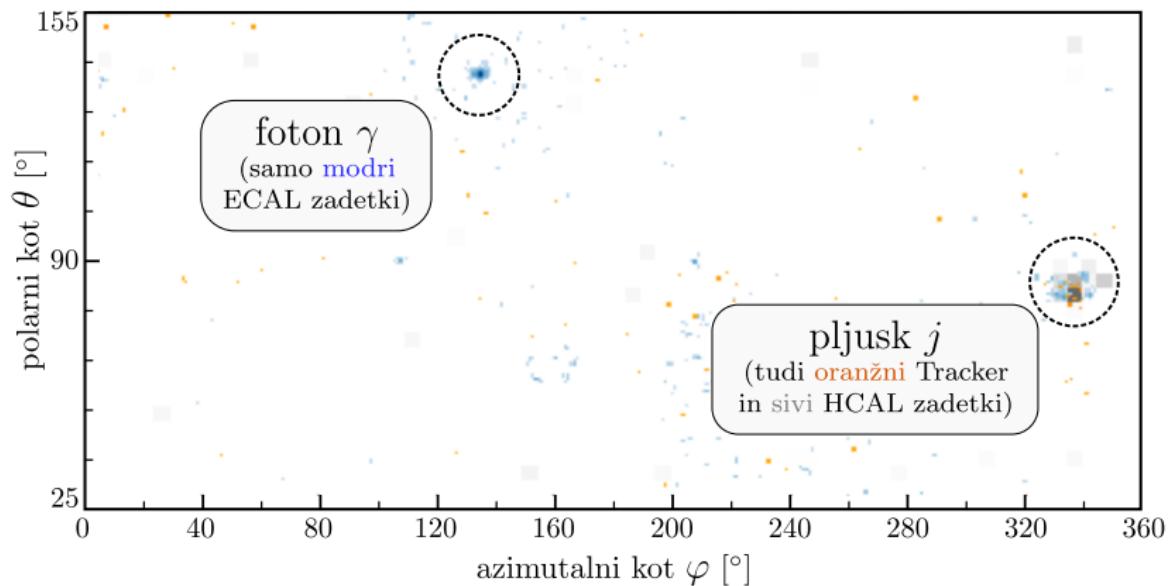
- ▶ Primerjamo CNN in FCN
- ▶ CNN da boljše rezultate!

Oglejmo si zakaj...



# Interpretacija rezultatov

Spomnimo se, kako izgledajo detektorske meritve...



# Interpretacija rezultatov

CNN vidi tole:



FCN vidi tole:

$$p_T \approx 55 \text{ GeV}$$

$$\varphi \approx 136^\circ$$

$$\theta \approx 37^\circ$$

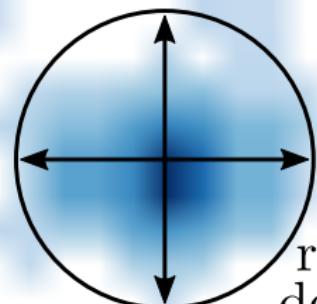
$$p_T \approx 65 \text{ GeV}$$

$$\varphi \approx 335^\circ$$

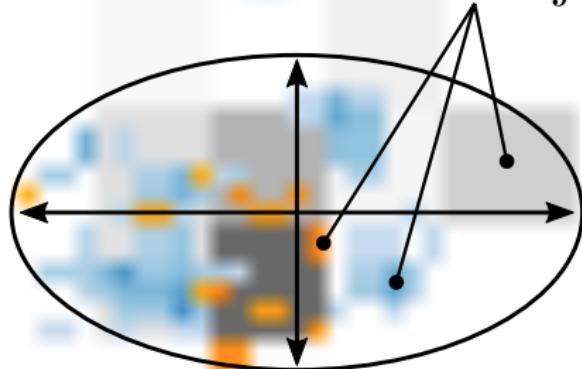
$$\theta \approx 98^\circ$$

# Interpretacija rezultatov

CNN vidi tole:



različni  
detektorji



FCN vidi tole:

$$p_T \approx 55 \text{ GeV}$$

$$\varphi \approx 136^\circ$$

$$\theta \approx 37^\circ$$

$$p_T \approx 65 \text{ GeV}$$

$$\varphi \approx 335^\circ$$

$$\theta \approx 98^\circ$$

# Nauk študije in zaključek

*CNN lahko loči procese glede na distribucijo izmerkov tudi, ko je kinematika podobna.*

## Lepe lastnosti neposredne klasifikacije

- ▶ Ohrani vso informacijo iz detektorja
- ▶ Izkoristi prostorsko distribucijo dogodkov
- ▶ Splošno in fleksibilno orodje

# Nauk študije in zaključek

*CNN lahko loči procese glede na distribucijo izmerkov tudi, ko je kinematika podobna.*

## Lepe lastnosti neposredne klasifikacije

- ▶ Ohrani vso informacijo iz detektorja
- ▶ Izkoristi prostorsko distribucijo dogodkov
- ▶ Splošno in fleksibilno orodje

Hvala!

# Viri I

- [1] M. Andrews, M. Paulini, S. Gleyzer, and B. Poczos,  
*End-to-End Physics Event Classification with CMS Open Data: Applying Image-Based Deep Learning to Detector Data for the Direct Classification of Collision Events at the LHC*,  
Computing and Software for Big Science 4 (2020),  
ISSN: 2510-2044,  
URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s41781-020-00038-8>.
- [2] CMS Collaboration, *The Crystal Tower*, 2014,  
URL: <https://cds.cern.ch/record/1998528>.
- [3] CMS Collaboration, *Using Russian Navy Shells*, 2020,  
URL: <https://cms.cern/detector/measuring-energy/using-russian-navy-shells> (visited on 05/25/2021).
- [4] ATLAS Experiment,  
*Proton Collision Event with Boosters and LHC*, 2011,  
URL: <https://www.youtube.com/watch?v=NhXMXiXOWAA>.

# Viri II

- [5] Julie Haffner, *The CERN accelerator complex*, General Photo, 2013, URL: <https://cds.cern.ch/record/1621894>.
- [6] Alex Krizhevsky, Ilya Sutskever, and Geoffrey E. Hinton, *ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks*, (2012), URL: <http://papers.nips.cc/paper/4824-imagenet-classification-with-deep-convolutional-neural-networks.pdf>.
- [7] Tai Sakuma, *Cutaway diagrams of CMS detector*, 2019, URL: <https://cds.cern.ch/record/2665537>.
- [8] Matthew D. Zeiler and Rob Fergus, *Visualizing and Understanding Convolutional Networks*, CoRR **abs/1311.2901** (2013), URL: <http://arxiv.org/abs/1311.2901>.