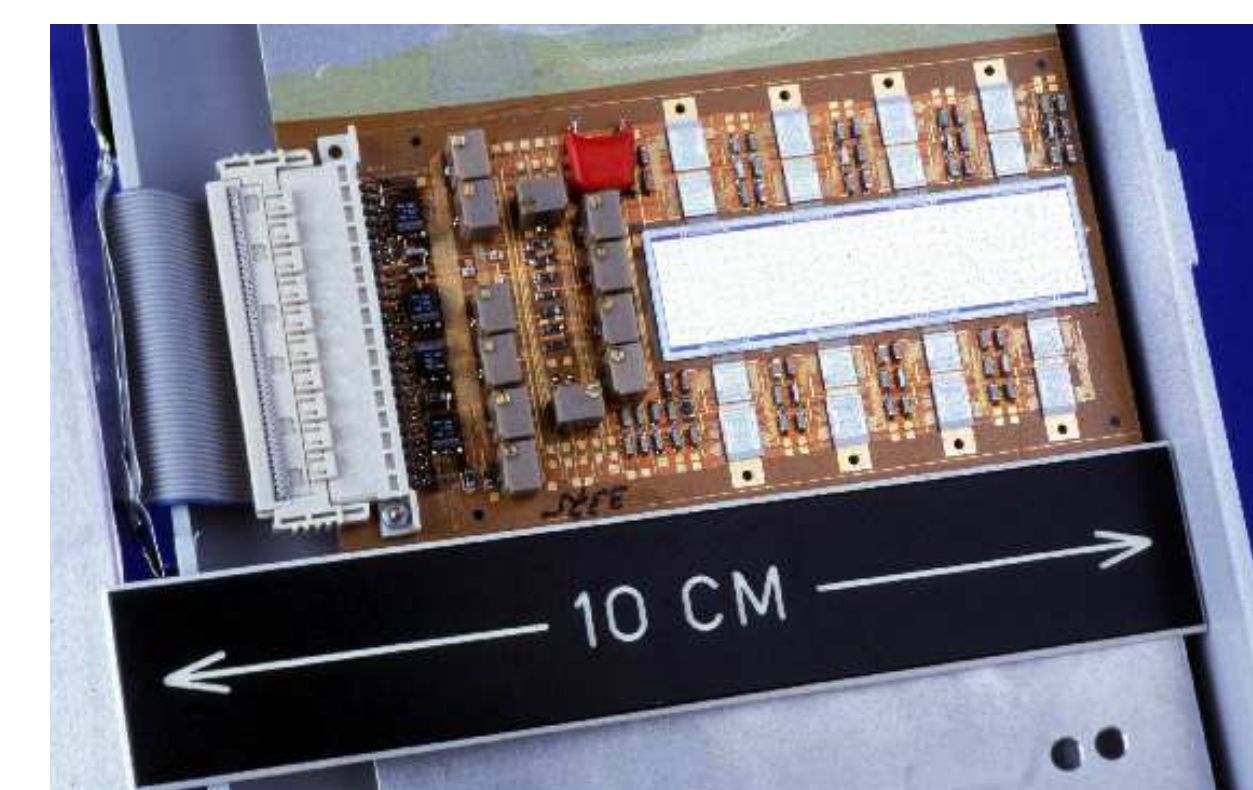


Comptonska kamera: nov način detekcije žarkov γ

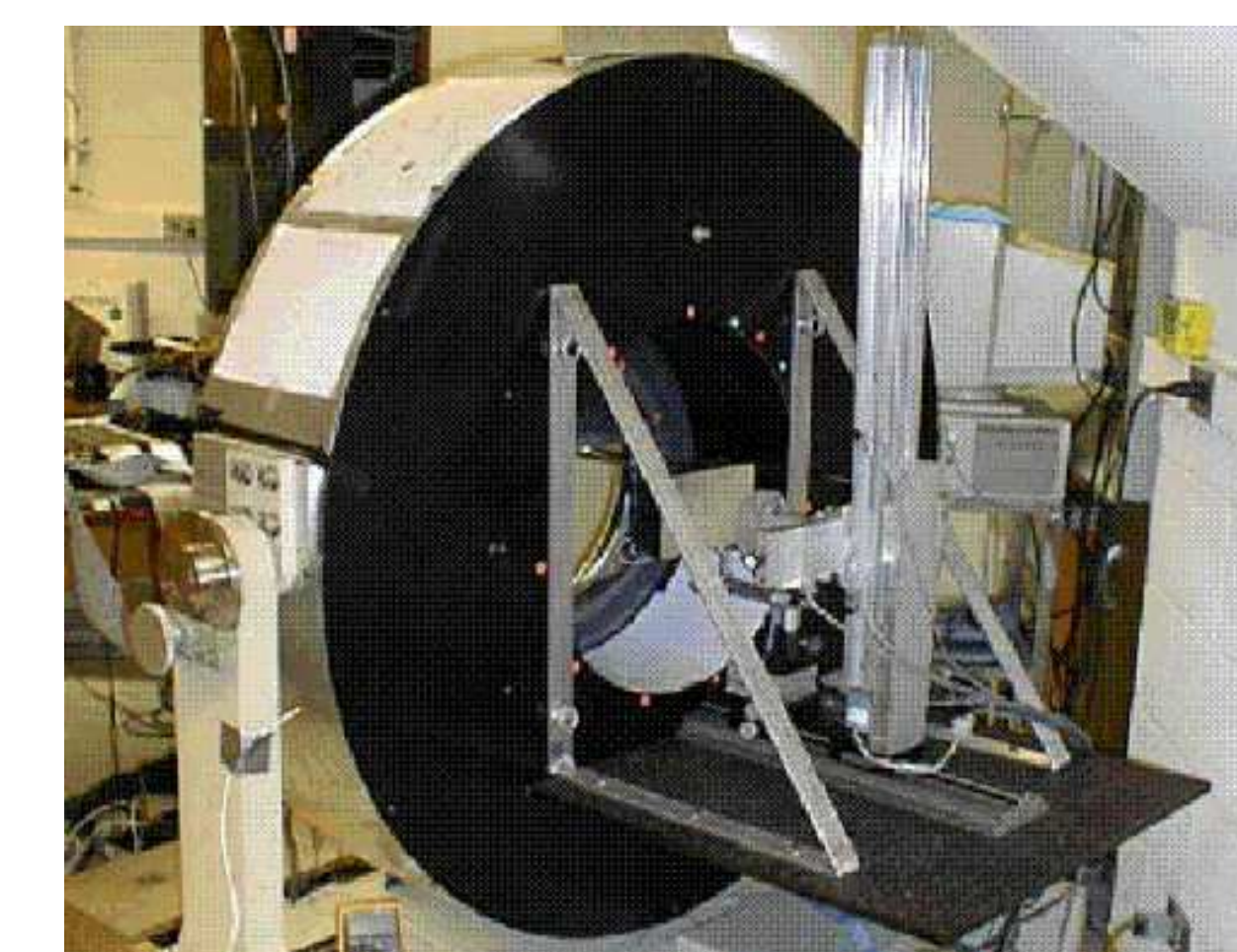
Andrej Studen, Institut Jožef Stefan, za kolaboracijo CIMA
elektronska pošta avtorja: Andrej.Studen@ijs.si

Preizkus delovanja

- Sistem C(ompton)-SPRINT, Ann Arbor.

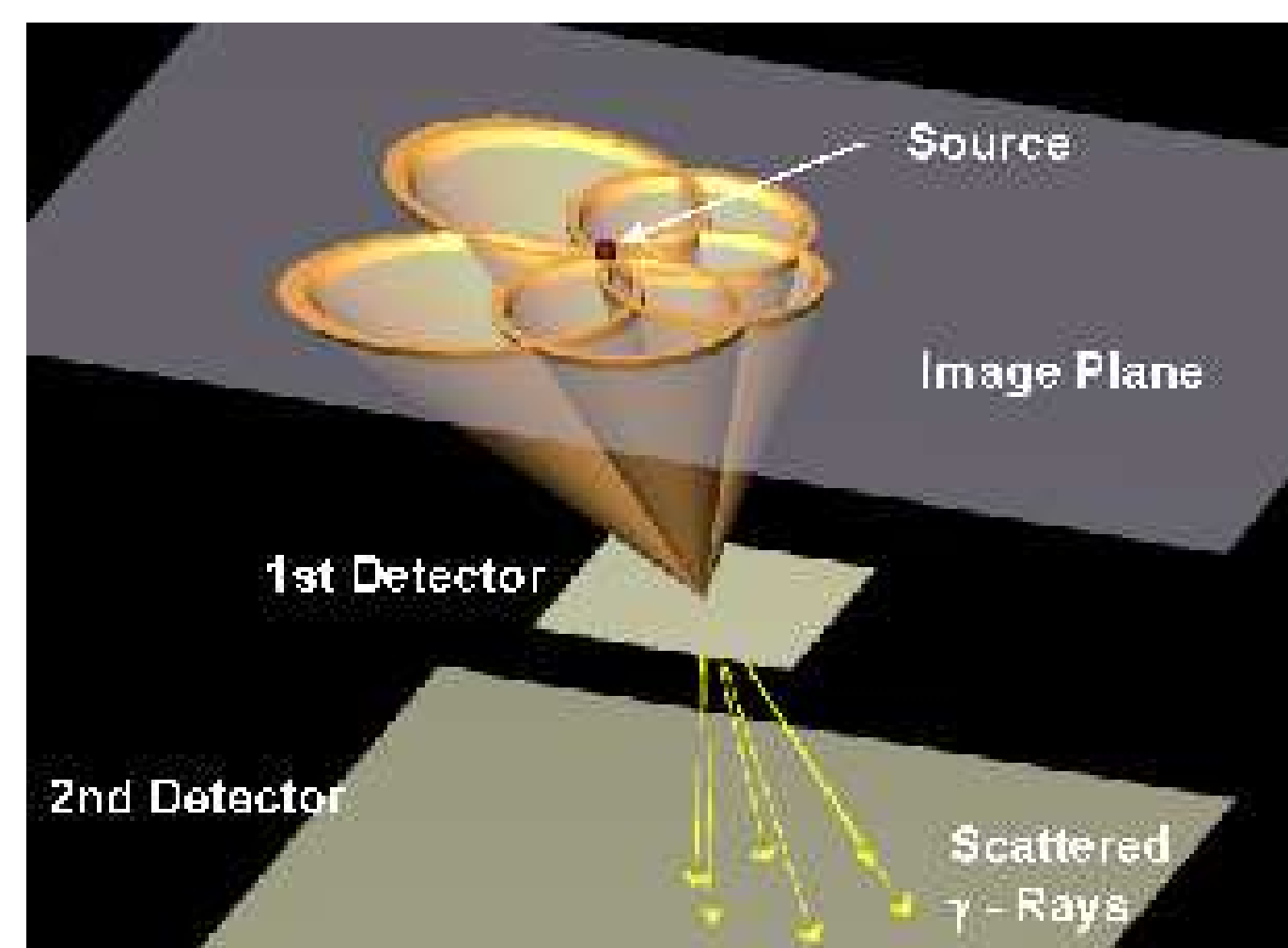


Modul s silicijevim detektorjem.



Modul SPRINT s silicijevim modulom v sredini.

Princip delovanja



Shema comptonske kamere.

Comptonska kamera je detektor 3D porazdelitve monokromatskih sevalcev žarkov γ na osnovi Comptonovega pojava:

- Detekcija Comptonovega pojava:
 - Točka interakcije.
 - Kinetična energija izbitega elektrona (E_e).
 - Smer odbitega fotona \rightarrow dva detektorja
- Rekonstrukcija lege sevalca po Comptonovi enačbi

$$\frac{E_e}{E_\gamma} = \frac{\varepsilon(1 - \cos\theta)}{1 + \varepsilon(1 - \cos\theta)} \Rightarrow \theta \quad (1)$$

- Presečišče stožcev nam da pozicijo sevalca

Primerjava z obtoječimi kamerami

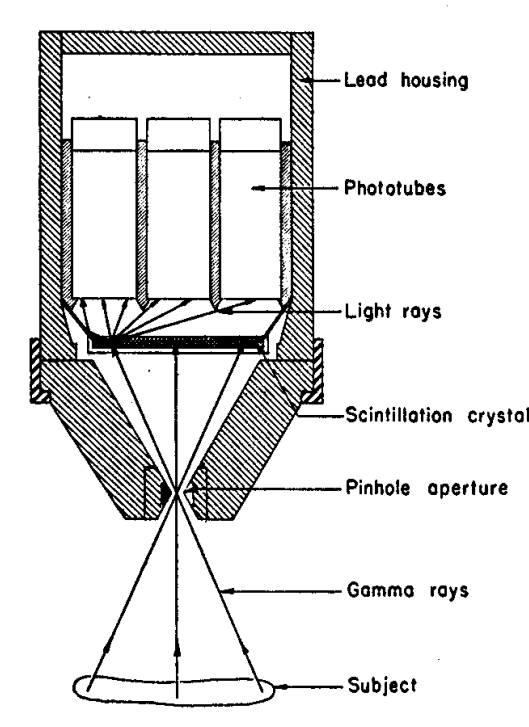


FIG. 1. Sectional drawing of scintillation camera.

Angerjeva kamera je trenutno edini delujoči detektor porazdelitve sevalcev. Shema.

- Primerjava z Angerjevo kamerom:

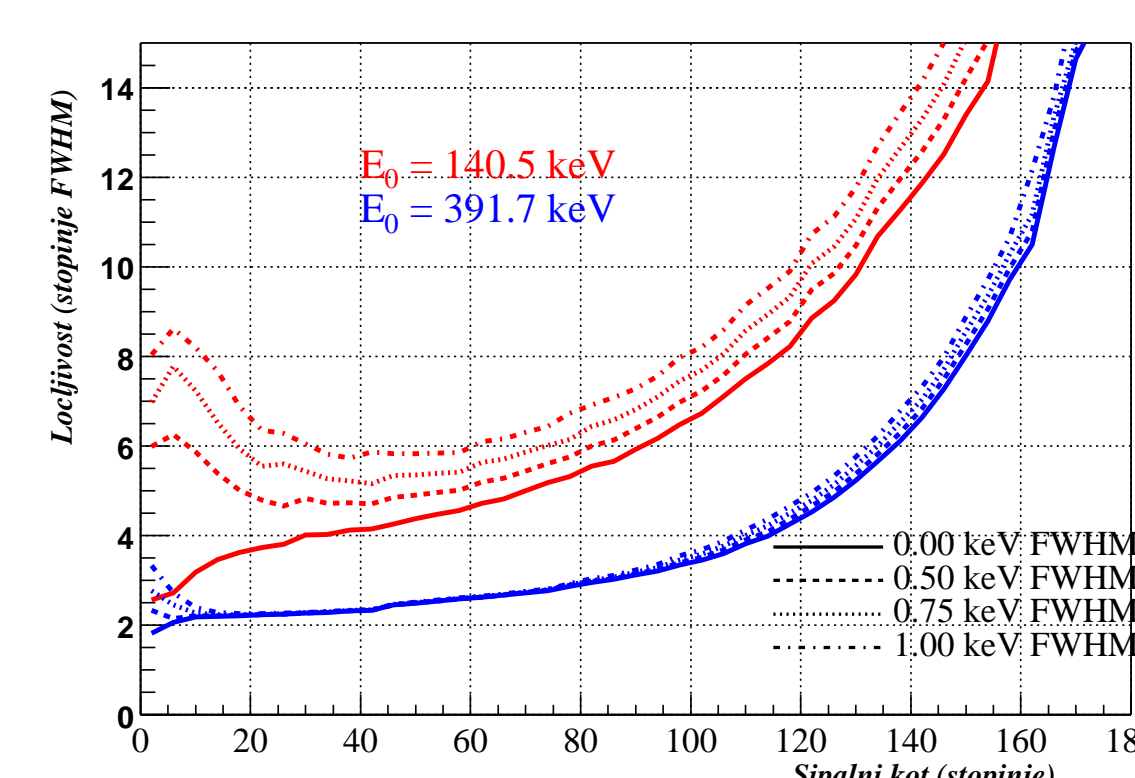
	Angerjeva kamera	comptonska kamera
tip interakcije fotonov	fotofekt (Compton moteč)	Comptonov pojav (fotofekt moteč)
sestava	scintilatorji/fotopomnoževalke	silicij, scintilatorji/fotopomnoževalke
rekonstrukcija	svinčena zaslonka	Comptonov pojav
izkoristek	10^{-5}	10^{-3}
prostorska ločljivost	10 mm	3 mm

- Za označevanje molekul uporabljajo v radiologiji sevalce fotonov energij nad 50 keV, za katere je v večini snovi prevladujoča interakcija fotonov Comptonov pojav!

Meje ločljivosti

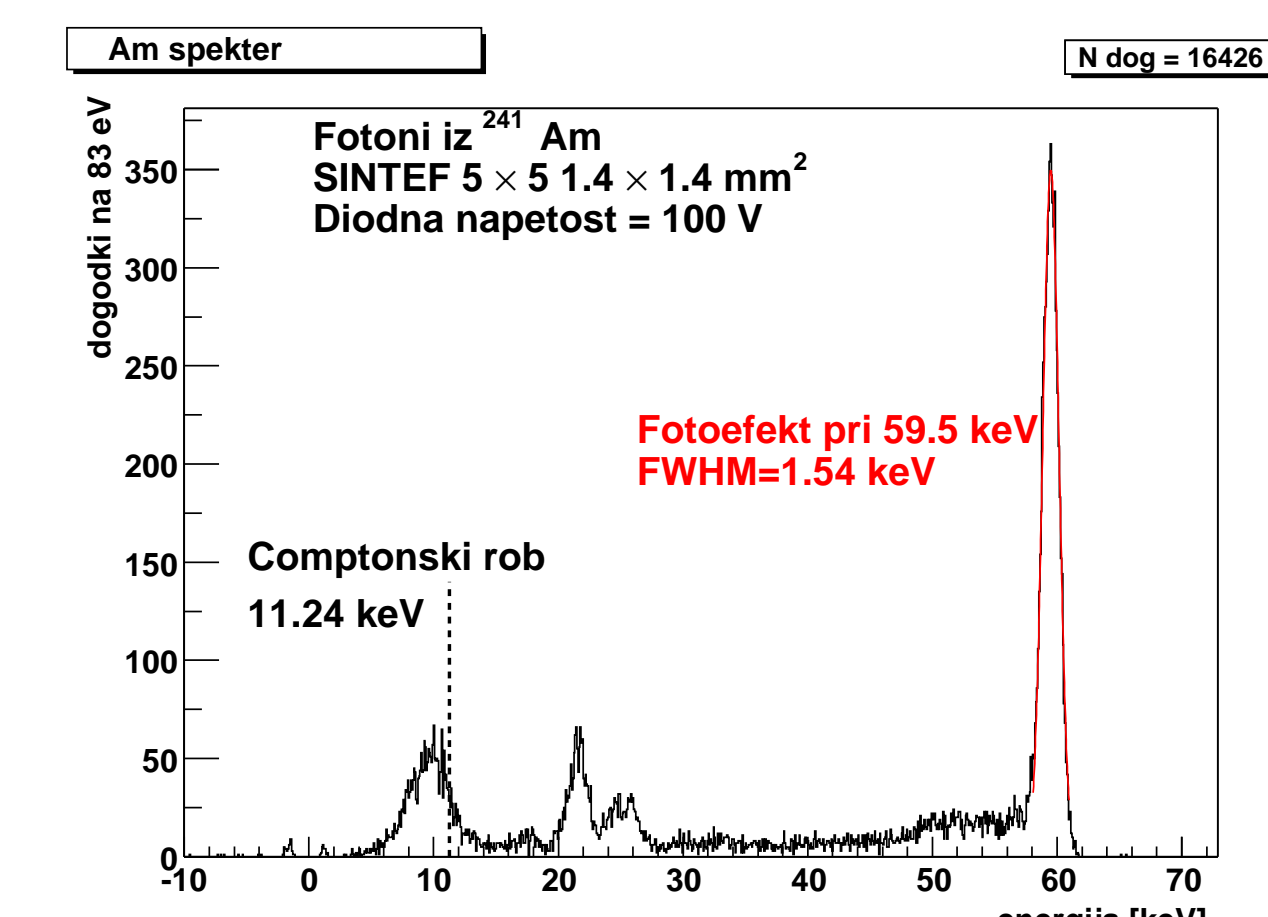
Prostorska ločljivost odvisna od:

- Prostorske ločljivosti obeh detektorjev
- Energijske ločljivosti sipalnega detektorja
- Napake pri rekonstrukciji sipalnega kota (Dopplerjev pojav)

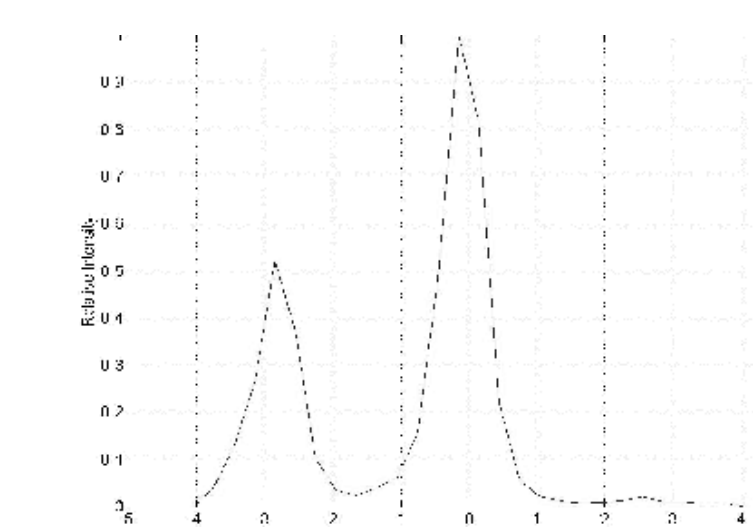
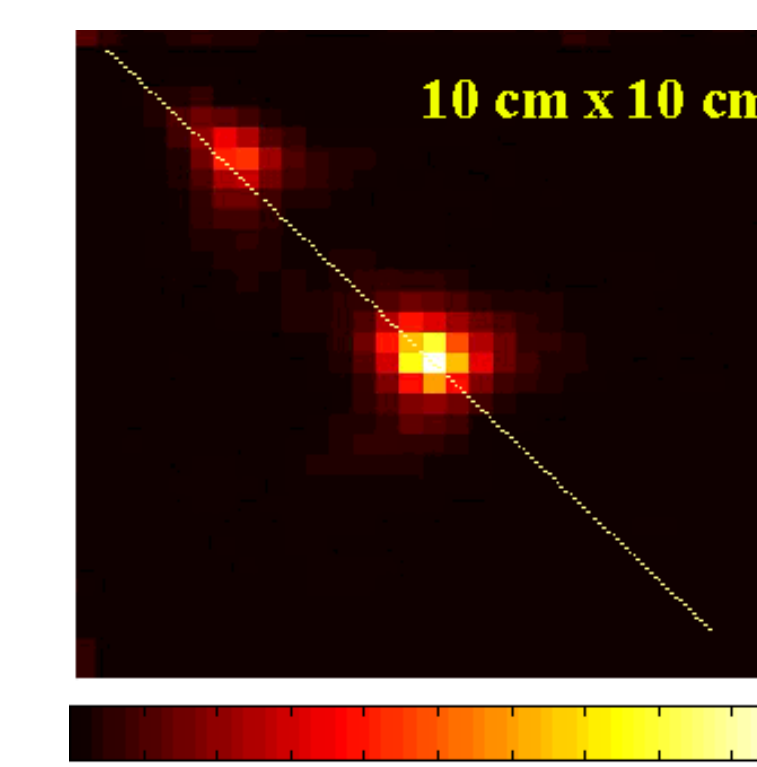


Vsota napak zaradi Dopplerjevega pojava in natančnosti sipalnega detektorja.

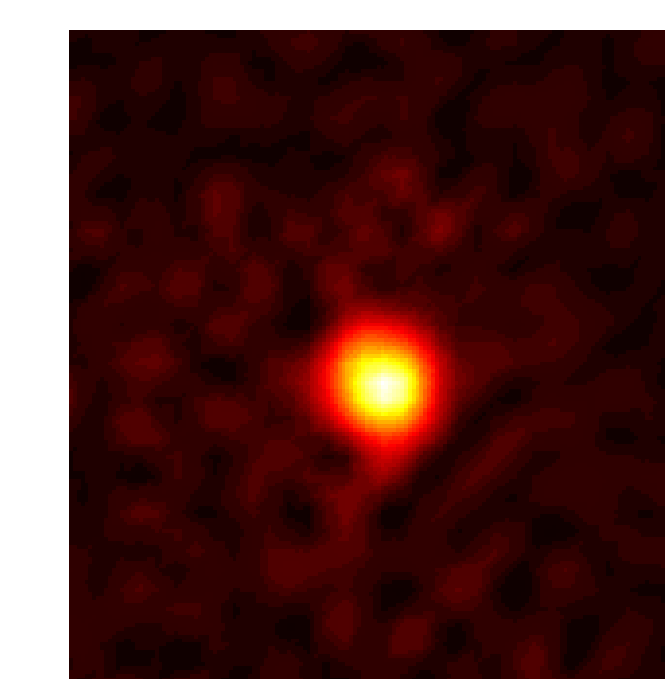
- $1^\circ \approx 0.5$ mm na tipični razdalji 3 cm
- Dosegljive natančnosti 2~3 mm.
- Potrebna je energijska ločljivost 1 keV FWHM v sipalnem detektorju.



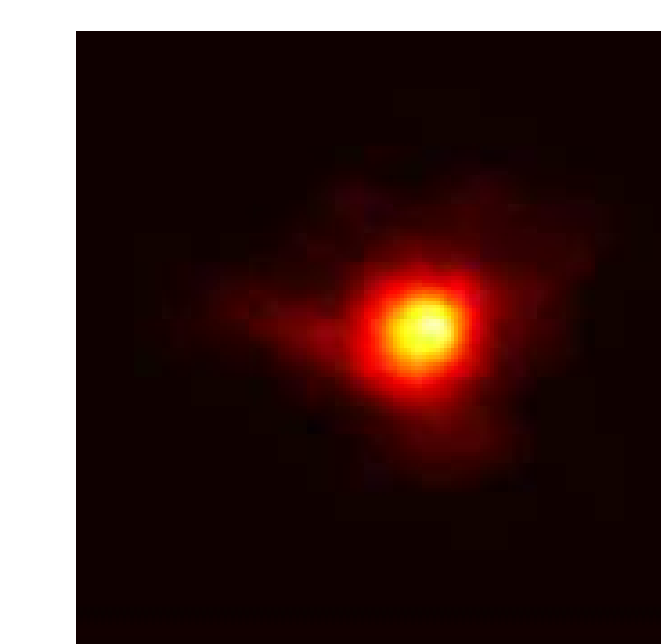
Razširitev črte fotofekta v silicijevem detektorju.



- **Prostorska ločljivost detektorja.** Dva točkasta sevalca, ^{131}I , 364 keV, razmakljena za 3 cm, 11 cm od sipalnega detektorja.
 - Ocenjen FWHM 6 mm ($\approx 3^\circ$).



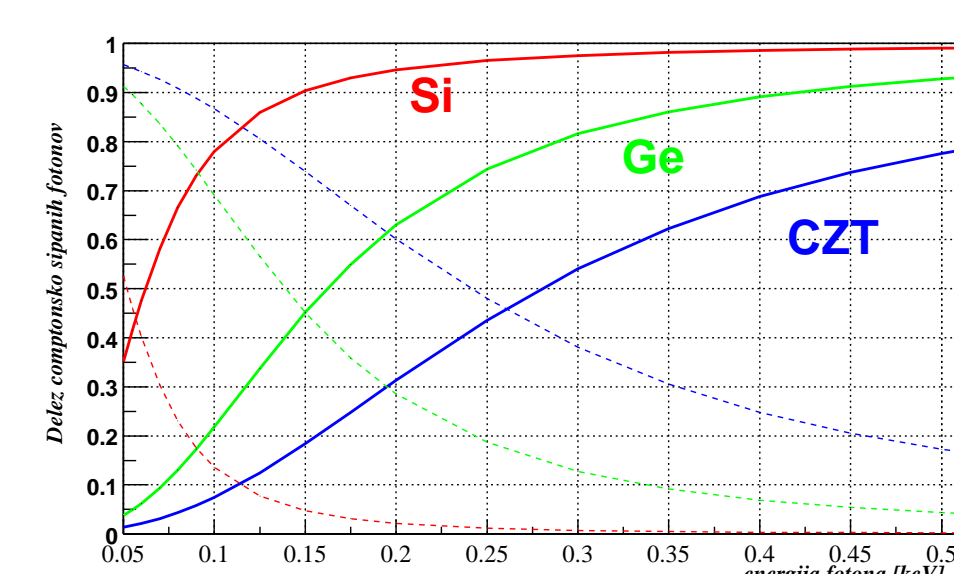
Anger Camera



C-SPRINT

- **Primerjava z delujočimi kamerami.** Točkast sevalec $^{99\text{m}}\text{Tc}$, 140.5 keV.
 - Angerjeva kamera (levo) in C-SPRINT (desno), ekvivalentna natančnost
 - V C-SPRINTu potrebno **16-krat več** dogodkov za ekvivalentno natančnost rekonstrukcije. Vendar
 - C-SPRINT je zaznal **100-krat** več fotonov!

Sipalni detektor iz silicija



Primerjava relativnih atenuacijskih koeficientov za Comptonovo sipanje v nekaterih snoveh.



Primer silicijevih detektorjev na rezini.

Za sipalni detektor je naša raziskovalna skupina izbrala segmentirano polprevodniško diodo iz silicija. Nekateri razlogi:

- Velik delež Comptonovega pojava v fotonih interakcijah s silicijem (slika levo).
- Uporaba pri sobni temperaturi.
- Majhna energija, potrebna za nastanek para elektron-vrzel, torej dobra energijska ločljivost.
- Razvita tehnologija obdelave in segmentiranja (glej sliko).
- Prostorska ločljivost za elektrone do 1 μm ob primerni segmentaciji.
- Robustnost.

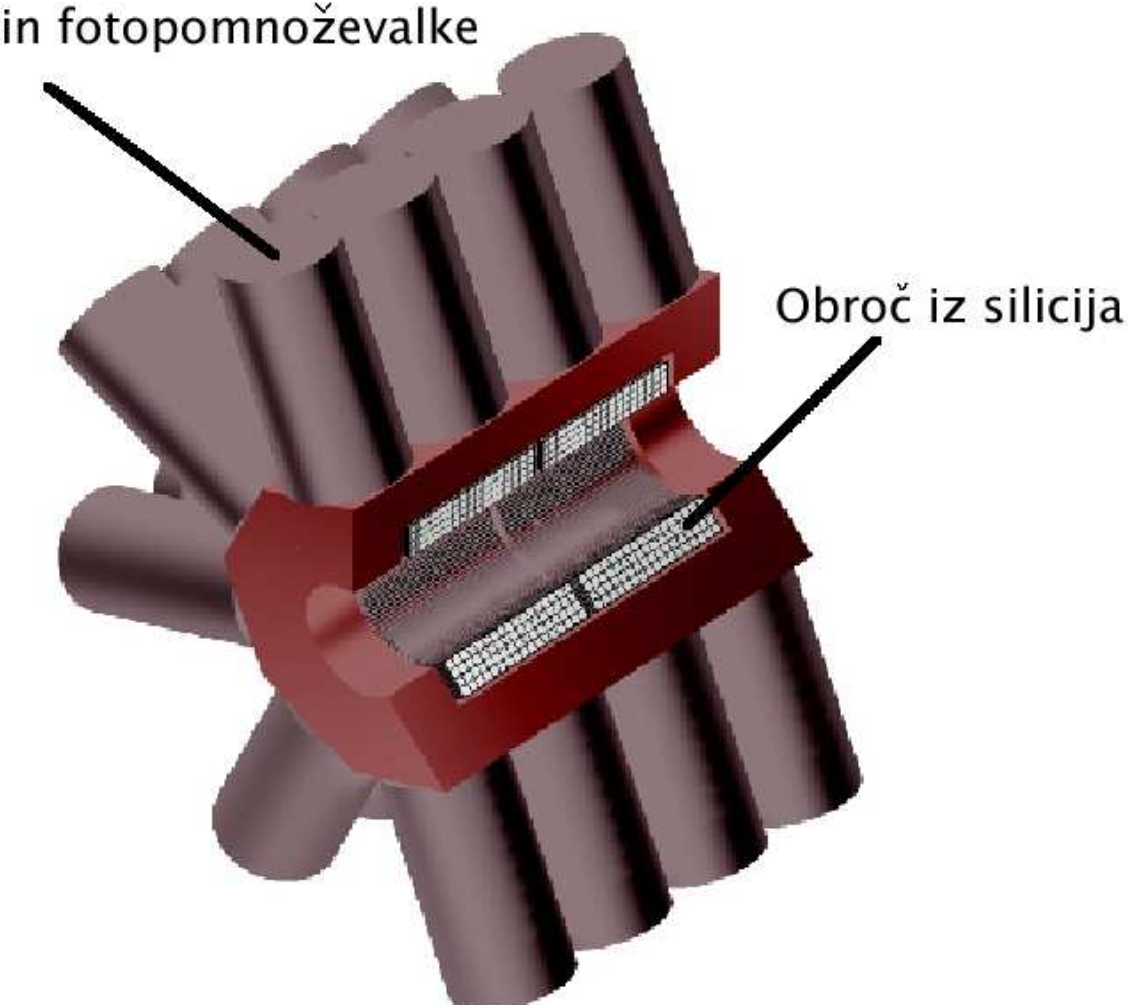
Seveda pa so tu tudi slabe strani:

- Nizko atomsko število pomeni majhen atenuacijski koeficient (2 % zaznanih fotonov v 1 mm pri 511 keV fotonih).
- Obdelava je prirejena debelinam do 1 mm, zato je za potrebne izkoristke nujno uporabiti več plasti detektorjev.

Sekundarni detektor: uveljavljen scintilatorski detektor žarkov.

Načrtovane aplikacije v radiologiji

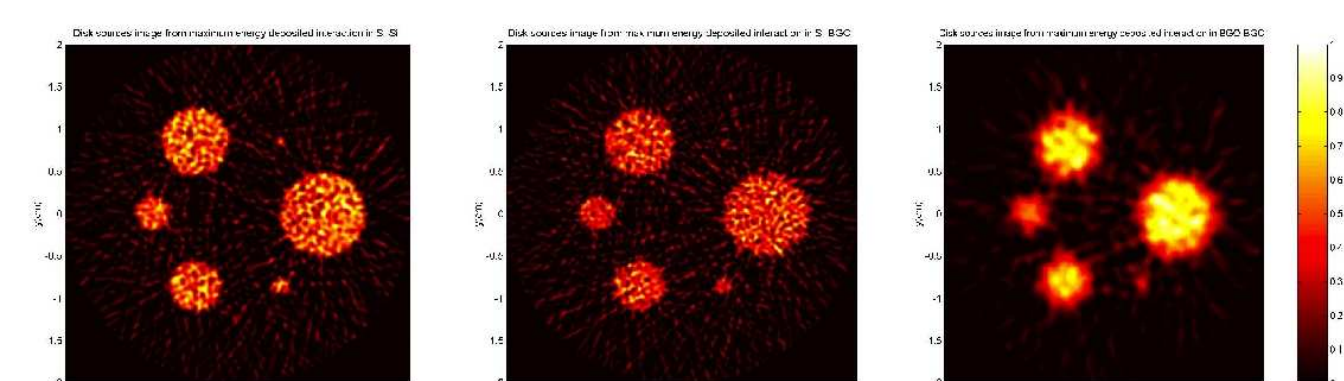
Scintilatorji in fotopomnoževalke
Klasični PET



- **Visoko ločljivi PET za male živali.**

- Detekcija para fotonov, ki nastane pri anihilaciji.
- Natančneje določanje točk interakcije v siliciju (1 μm napram 1 mm).
- Kombinacija klasičnega scintilatorskega PET detektorja in silicijevega obroča
- Trije tipi dogodkov:

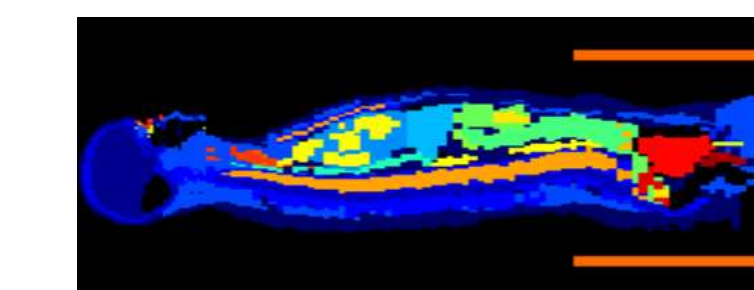
- * Oba fotona zaznamo v siliciju. Redko - manj kot 1 % izkoristek, natančnost pod 1 mm (na sliki levo).
- * Oba dogodka zaznamo v scintilatorju. Skoraj 100 % izkoristek (desno).
- * Mešani dogodki (sredina).



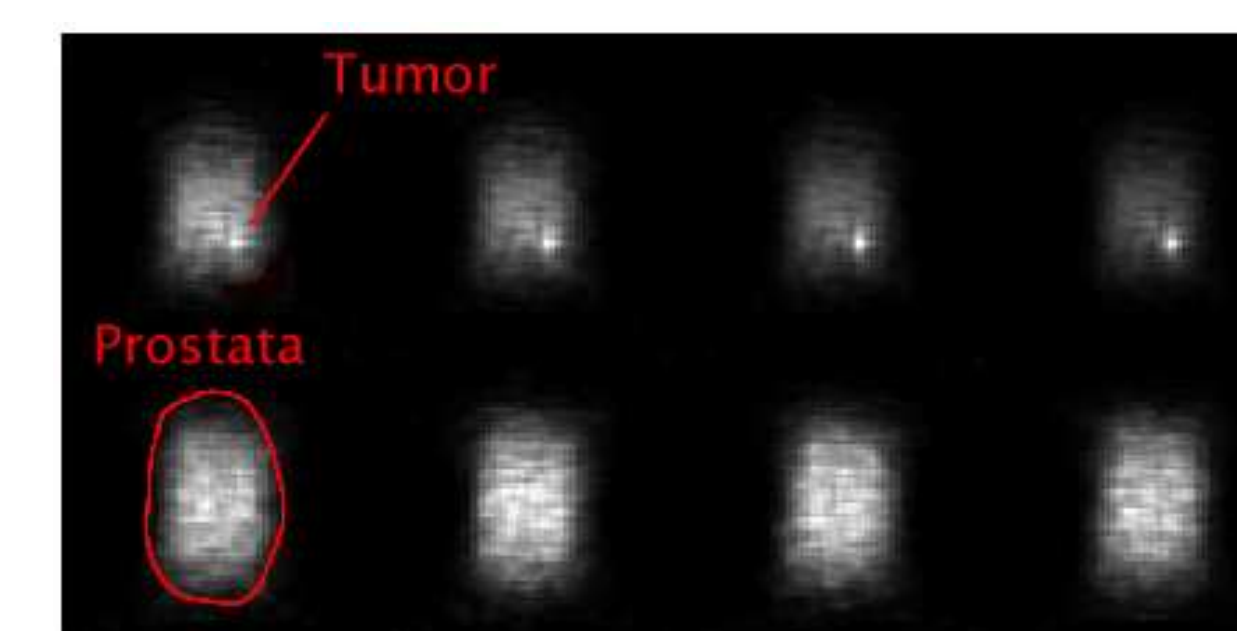
Zgoraj: PET aparat za slikanje malih živali, predlog. Spodaj: Simulirana rekonstrukcija diskastih virov premerov od 1 mm do 10 mm, različni tipi dogodkov.

- **Sonda za prostato**

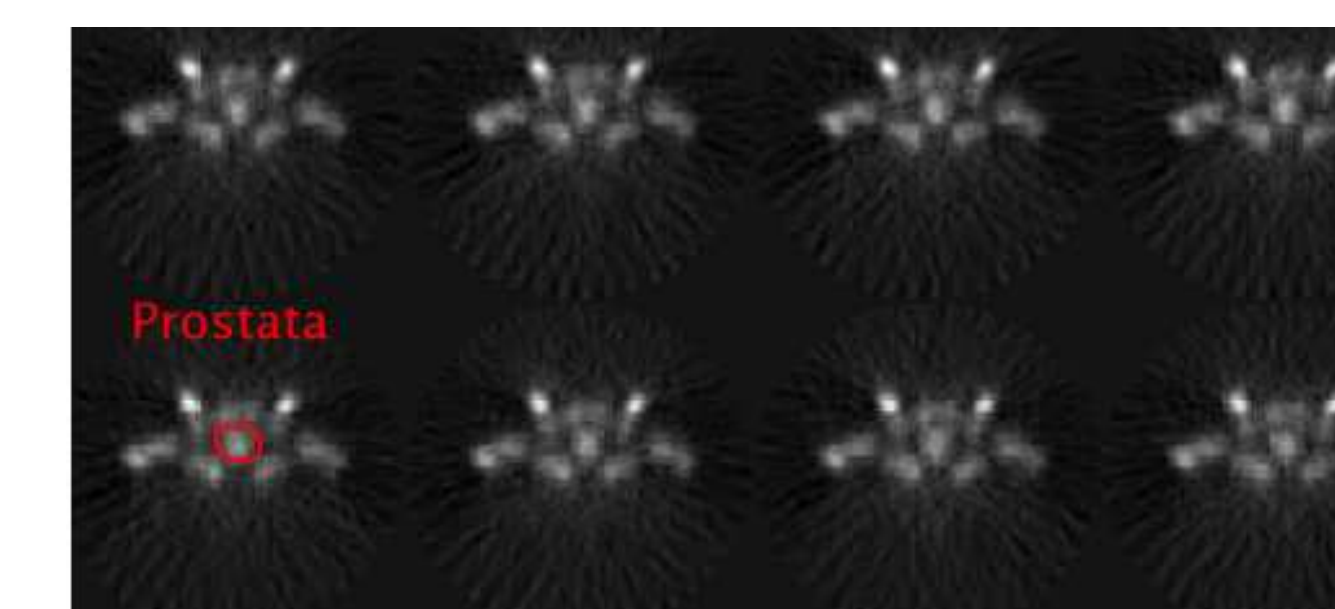
- Rak na prostati je drugi najbolj pogosti rak med moškimi.
- Simulacija:
 - * Računalniški fantom človeškega telesa iz 4 mm kock (desno).
 - * Sonda s sipalnim detektorjem intrarektalno.
 - * Sekundarni detektor: scintilatorski PET obroč.
 - * Rekonstruirana slika simulirane prostate s comptonsko in Angerjevo kamerom (slika spodaj).



Računalniški fantom s silicijevo sondo intrarektalno ob prostati (rdeče). Scintilatorski detektor obdaja telo (oranžno).



Comptonska kamera (levo) in Angerjeva kamera pri detekciji tumorja (sevalec ^{111}In , 171 keV) v prostati. Zgoraj realizacije s tumorji relativnih intenzitet zaporedoma 5:1, 10:1, 15:1, in 20:1 napram ozadju, spodaj realizacije brez tumorjev (simulacija).



Kolaboracija CIMA

V. Cindro^a A. Clark^b N. H. Clinthorne^c A. Czernak^d W. Dulinski^e J. Fuster^f F. Garibaldi^g E. Grigoriev^h L. Hanⁱ K. Hohnscheid^j H. Kagan^k C. Lacasta^l G. Llosa^m N. Malakhovⁿ D. Meier^o M. Mikuž^p E. Nappi^q E. Nygarard^r S. J. Park^s G. Pignatelli^t T. Pritchard^u S. Roe^v W. L. Rogers^w P. Weilhammer^x H. Zaidi^y D. Žontar^z

^a Institut Jožef Stefan in Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, Ljubljana, Slovenija ^b Univerza Ženeva, oddelek za fiziko, Ženeva, Švica ^c Medical School, University of Michigan, Ann Arbor, ZDA ^d Niewodniczanski Institute of Nuclear Physics, Crakov, Poljska ^e LEPSI, IN2P3/CNRS-ULP, Strasbourg, Francija ^f Inst. de Física Corpuscular, CSIC, Universitat de Valencia, Valencia, Španija ^g ISS, Rim, Italija ^h Univerzitetna bolnišnica, Ženeva, Švica ⁱ College of Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, ZDA ^j Ohio State University, Columbus, Ohio, ZDA ^k INFN, Pisa, Italija ^l Ideas ASA, Oslo, Norveška ^m INFN, Bari, Italija ⁿ Univerza Perugia, Italija ^o CERN, Ženeva, Švica

Kolaboracija CIMA (Cameras for Imaging in Medical Applications) skuša prenesti znanje in izkušnje eksperimentalne fizike osnovnih delcev v medicino, točneje v radiologijo. Eden od projektov, vključenih v to splošno shemo je tudi comptonska kamera. Namen projekta je razvoj detektorskega sistema osnovanega na kinematiki Comptonovega pojava za rekonstrukcijo prostorske porazdelitve sevalcev žarkov γ v razsežnih objektih, predvsem v tkivih ljudi in sesalcev.