



COMPTONOVA KAMERA

Dejan Žontar

Odsečni seminar

- Uvod
 - Uporaba - kje in zakaj?
 - Obstoječi detektorji
 - SPECT kolimacija
- Osnove delovanja
 - Comptonov efekt
 - SPECT
 - PET
- Silicij kot sipalni detektor
 - Energijska ločljivost
 - Pozicijska ločljivost
 - Izkoristek
 - Čitalna elektronika
- Dosedanji rezultati
 - SPECT
 - PET
- Načrti
- Zaključek





Uvod: Uporaba - kje in zakaj?

Slikanje v jedrski medicini

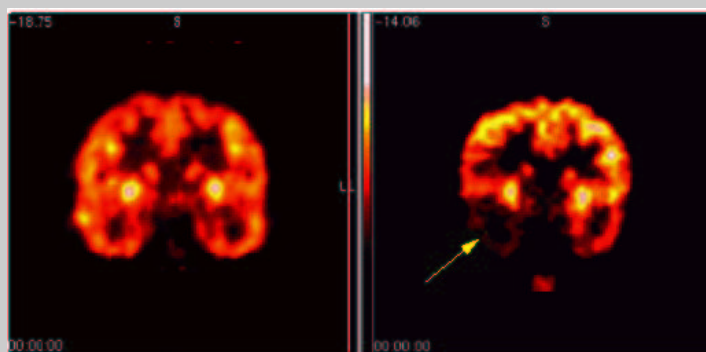
Z radioaktivnim izotopom (tracer) označeno spojino vmesemo v telo, kjer se akumulira v specifičnih predelih.

Področja uporabe:

- medicinska diagnostika (slikanja organov, tumorjev...)
- medicinske raziskave (metabolizem, delovanje organov...)
- biološke raziskave (izražanje genov, raziskave in-vivo...)

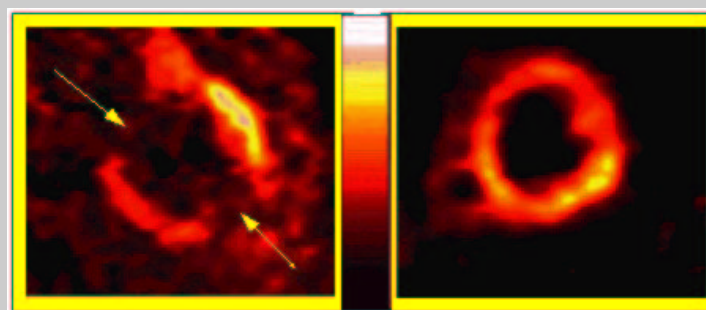
Osnovni parametri:

- Energijsko območje: $E_\gamma \approx 80 - 511 \text{ keV}$
- Tipični objekti:
 - zvezni, $2R < 30 \text{ cm}$
 - nizek kontrast
- 3D rekonstrukcija



Zdravi možgani

Epilepsija

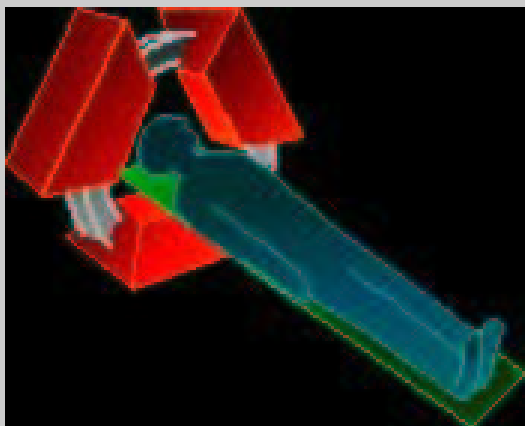


Srčna kap

Zdravo srce

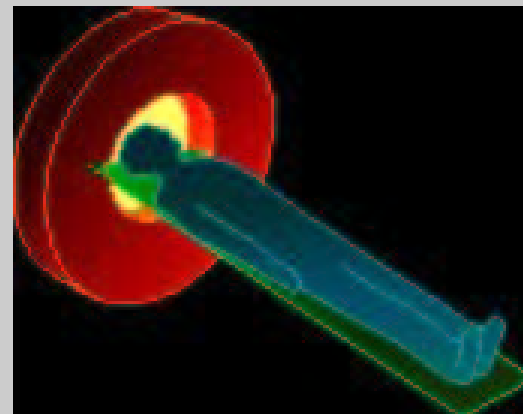


Uvod: Obstoječi detektorji



SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography)

- Izsevan 1 foton - potrebna kolimacija
- Zelo slaba občutljivost ($\approx 10^{-4}$)
- Slaba prostorska ločljivost (≈ 8 mm)
- Ločljivost se slabša z naraščajočo E_γ
- Dostopna cena



PET (Positron Emission Tomography)

- Izsevana 2 fotona - kolimacija ni potrebna
- Dobra prostorska ločljivost (do ≈ 2 mm)
- Visoka cena
- Označevalci s kratko življ. dobo (nekaj minut) (^{11}C , ^{13}N , ^{15}O)

Uvod: SPECT kolimacija

Vsi obstoječi medicinski SPECT sistemi uporabljajo **mehansko kolimacijo** (Angerjeva kamera).

Mehanska kolimacija

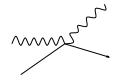
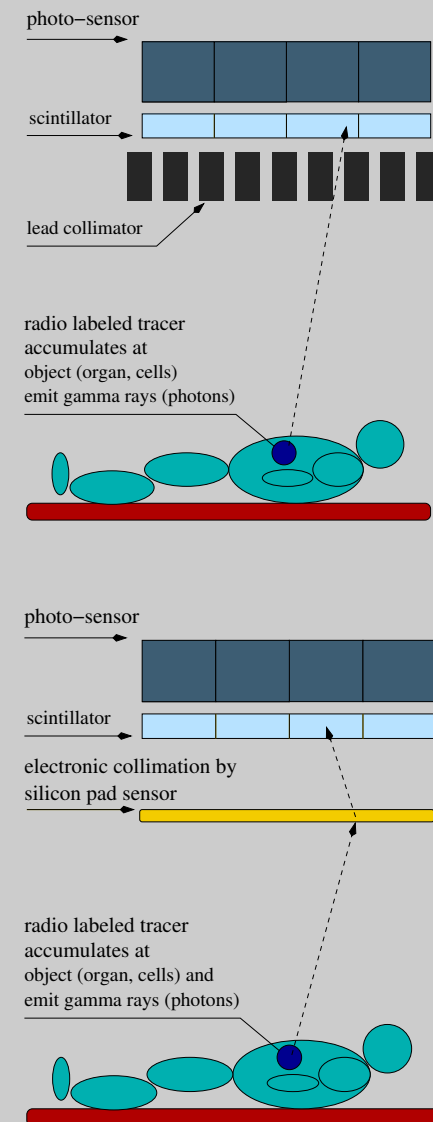
- sklopitev med izkoristkom in prostorsko ločljivostjo detektorja
- slaba pri velikih E_γ (> nekaj 100 keV)

Elektronska kolimacija (Comptonov efekt)

- namesto kolimatorja sipalni detektor
- ni sklopitve izkoristek/ločljivost
- boljši odziv za večji $E_\gamma \rightarrow$ razvoj novih označevalcev

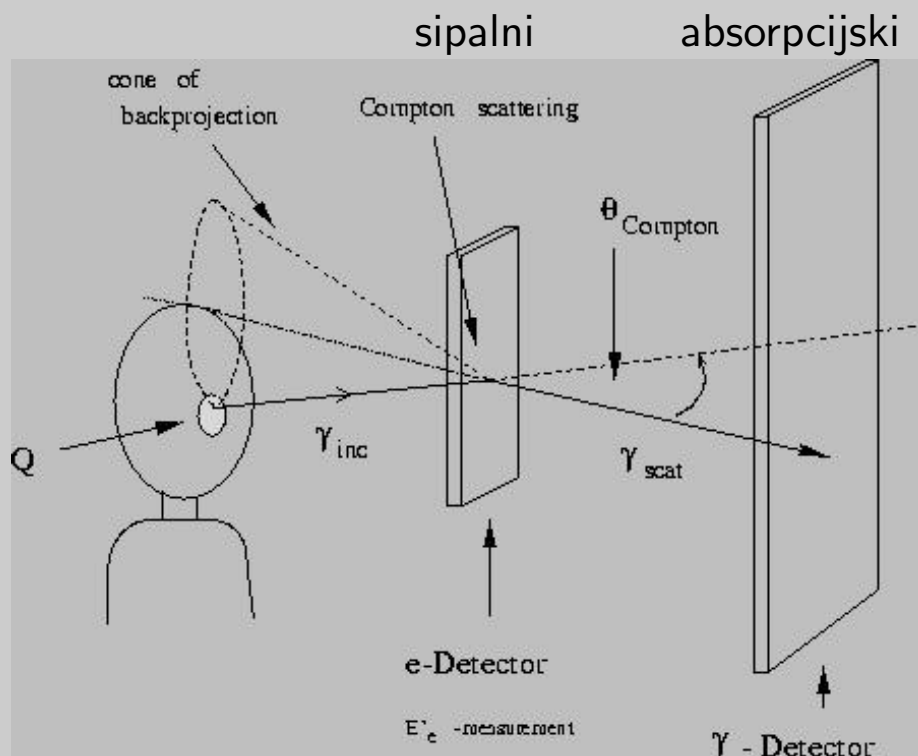


Comptonova kamera



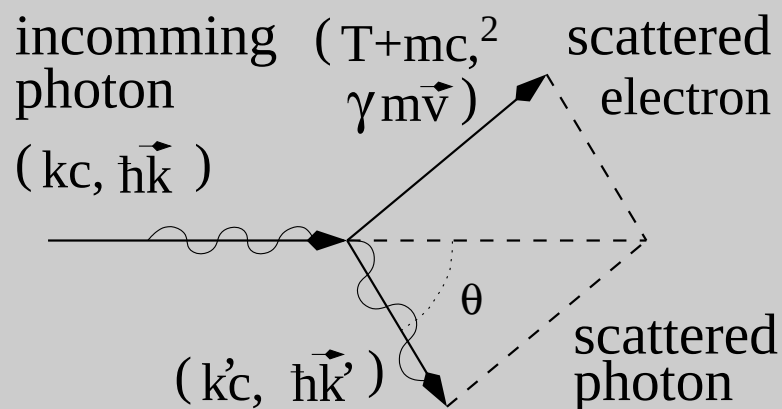


Osnove delovanja: Comptonov efekt



Comptonova kamera sestavljena iz dveh detektorjev:

- **Sipalni detektor**
Vpadni foton se comptonsko siplje.
 - velik presek za comptonsko sipanje (Si, Ge)
 - visoka energijska ločljivost
 - dobra krajevna ločljivost
- **Absorpcijski detektor**
Sipani foton se absorbira.
 - velik absorpcijski presek za (nekaj) 100keV γ (BGO, NaI, CsI)
 - dobra krajevna ločljivost
 - običajno scintilator



Izmerimo:

- točko interakcije v sipalnem detektorju
- točko interakcije v absorpcijskem detektorju
- energijo comptonskega elektrona
→ sipalni kot

Kinematika → sipalni kot Θ :

$$\cos \Theta = 1 - \frac{E_{dep}}{\frac{E_{\gamma}}{m_e c^2} (E_{\gamma} - E_{dep})}$$

- E_{γ} - energija vpadnega fotona
- E_{dep} - energija, deponirana v sipalnem detektorju

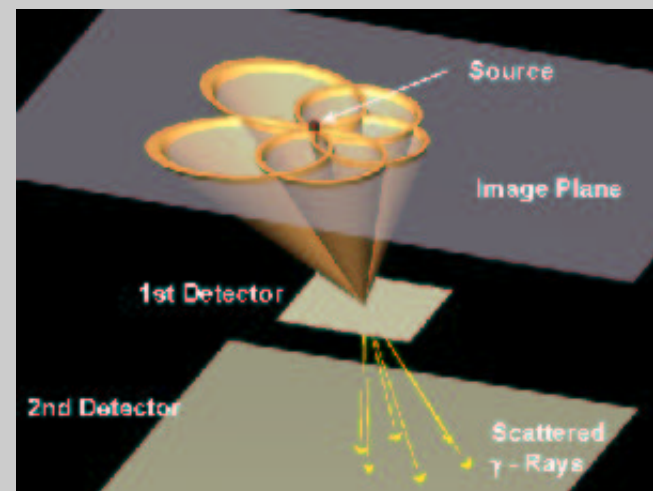
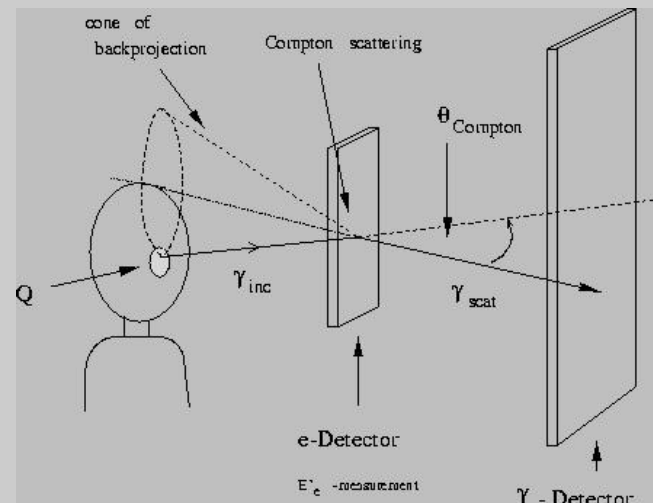
Osnove delovanja: SPECT

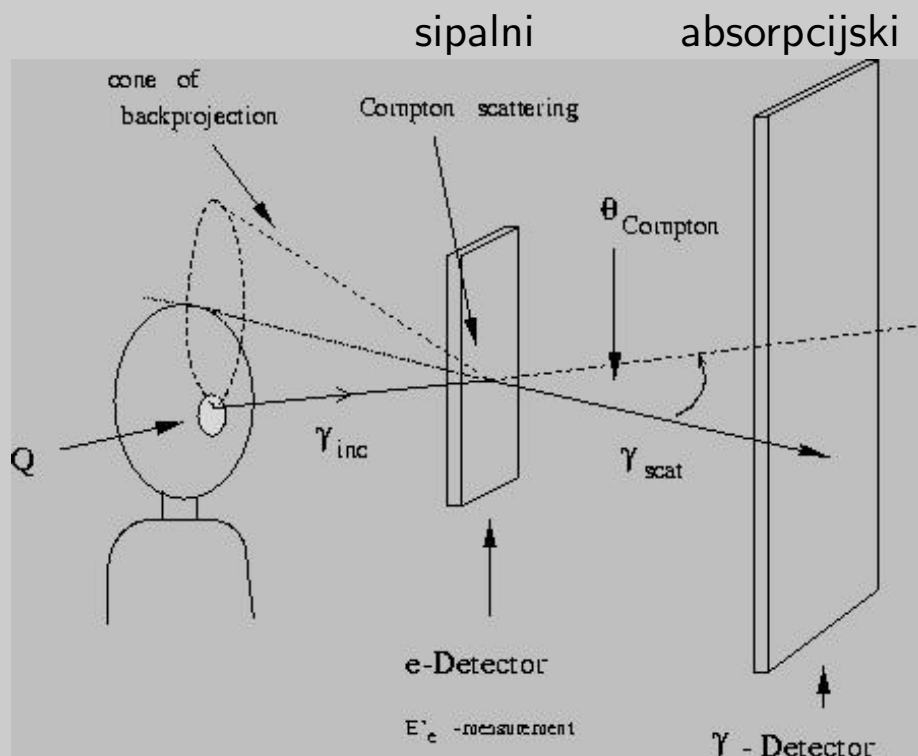
točka v sipalnem detektorju
+
točka v absorpcijskem detektorju
↓
smer sipanega fotona
+
sipalni kot
↓
možne smeri vpadnega fotona
(plašč stožca)

presečišča stožcev
(iz več dogodkov)
↓
položaj sevalca

Napaka rekonstrukcije odvisna od:

- pozicijske ločljivosti sipalnega det.
- pozicijske ločljivosti absorpcijskega det.
- energijske ločljivosti sipalnega det
- geometrije (razdalj)





Comptonova kamera sestavljena iz dveh detektorjev:

- **Sipalni detektor**

Vpadni foton se comptonsko siplje.

- velik presek za comptonsko sipanje (Si, Ge)
- visoka energijska ločljivost
- dobra krajevna ločljivost

- **Absorpcijski detektor**

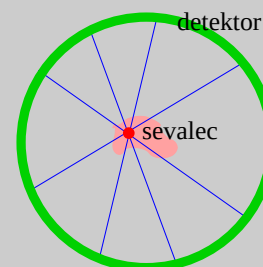
Sipani foton se absorbira.

- velik absorpcijski presek za (nekaj) 100keV γ (BGO, Nai, Xe)
- dobra krajevna ločljivost
- običajno scintilator



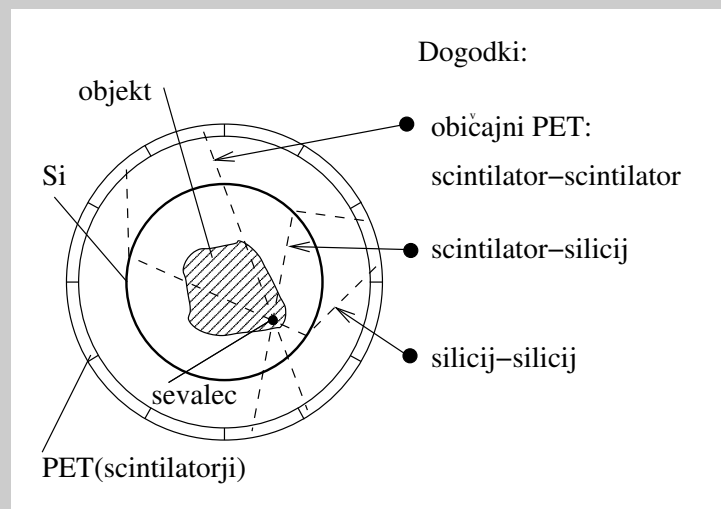
Osnove delovanja: PET

Anihilacija pozitrona $\rightarrow$ dva skoraj kolinearna fotona
 $\rightarrow$ kolimacija ni potrebna



Glede na kraj interakcije fotonov ločimo tri tipe dogodkov:

- Oba interagirata v sipalnem detektorju
 - slab izkoristek
 - prostorska ločljivost mnogo boljša od obstoječih sistemov
- En interagira v sipalnem detektorju, drugi le v absorpcijskem
 - boljši izkoristek
 - prostorska ločljivost boljša od obstoječih sistemov
- Oba interagirata le v absorpcijskem detektorju
 - visok izkoristek
 - prostorska ločljivost enaka obstoječim sistemom





Silicij kot sipalni detektor



Prednosti silicija:

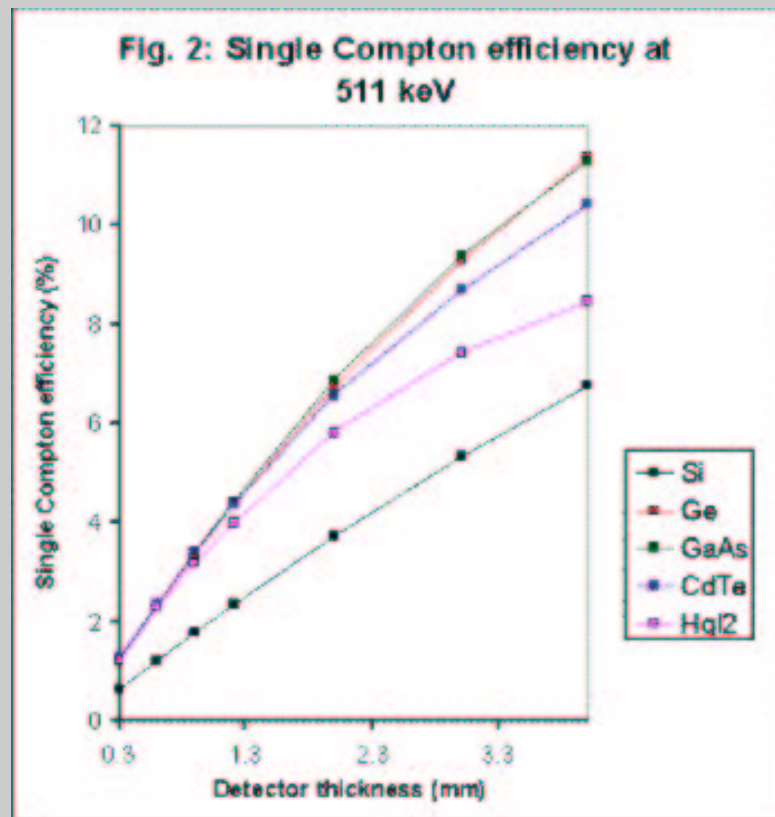
- visoko razmerje $\sigma_{\text{compt}}/\sigma_{\text{tot}}$ (blizu 1)
- dobro razvita tehnologija
- delovanje pri sobni temperaturi

Slabost:

- za enak izkoristek potreben 2.5x debelejši detektor kot za Ge.

Bistveni parametri detektorja:

- krajevna ločljivost
- energijska ločljivost
- izkoristek





Silicij kot sipalni detektor: Krajevna ločljivost

Krajevna ločljivost določena z:

- granulacijo detektorja
- dosegom comptonskega elektrona ($\approx 300 \mu\text{m}$)

Najbolj fina še smiselna granulacija torej $300 \mu\text{m}$.

Z obstoječo tehnologijo brez težav dosegamo znantno bolj fino granulacijo.

V praksi **granulacija omejena s številom kanalov** $\rightarrow$ tipično $\approx 1 \text{ mm}$.



Silicij kot sipalni detektor: Energijska ločljivost

Energijska ločljivost detektorja omejena z:

- zapornim tokom detektorja
 - tipično $\approx 0.4 \text{ nA/pad} \rightarrow 95 e^-$ ($2 \mu\text{s}$ shaping, $1\text{-}2 \text{ mm}^2$ pads, $d=300 \mu\text{m}$)
 - dosežejo že $\approx 0.01 \text{ nA/pad} \rightarrow 15 e^-$ ($2 \mu\text{s}$ shaping, 2 mm^2 pads, $d=300 \mu\text{m}$)
- šumom elektronike
 - tipično $\approx 4 \text{ pF/pad} \rightarrow 40 e^- + 12 e^-/\text{pF} = 90 e^-$ (2 mm^2 pads, $d=300 \mu\text{m}$)

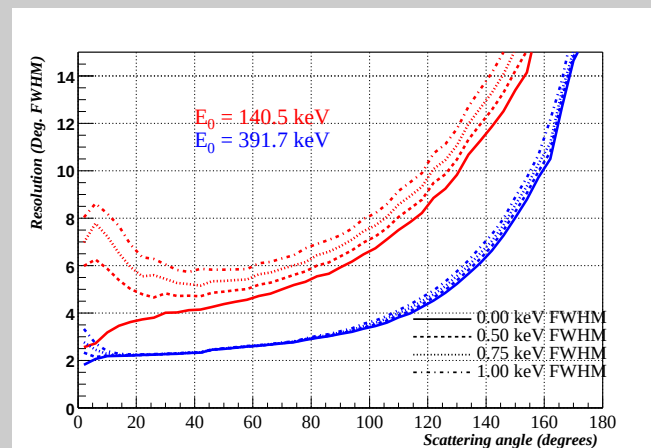
Poleg šuma detektorja še Dopplerjeva razširitev:

- posledica sipanja na vezanih e^- z $v \neq 0$
- za $E_\gamma=140 \text{ keV}$, $\theta=45^\circ$ $\Delta E_{dop} \approx 0.9 \text{ keV}$
- pada s sipalnim kotom

Obstoječi sistemi dosegaajo $\Delta E_{det} \approx 2 \text{ keV FWHM}$.

- SPECT: cilj $\Delta E_{det} \approx 1 \text{ keV FWHM}$ ($130 e^-$)
- PET: sprejemljiv tudi šum več $100 e^- \text{ ENC}$

Ker je napaka na kotu odvisna od relativne napake pri merjenju energije je vpliv šuma manjši za višje E_γ .



$$\Delta\theta = 2^\circ \rightarrow \Delta x = 3.5 \text{ mm @ } 10 \text{ cm}$$



Silicij kot sipalni detektor: Izkoristek

Izkoristek določen z:

- debelino detektorja
- geometrijo detektorja (pokritim prostorskim kotom)

Optimalna debelina: 16 mm

Debelina Si modula:

nekaj 100 μm do dobrega mm



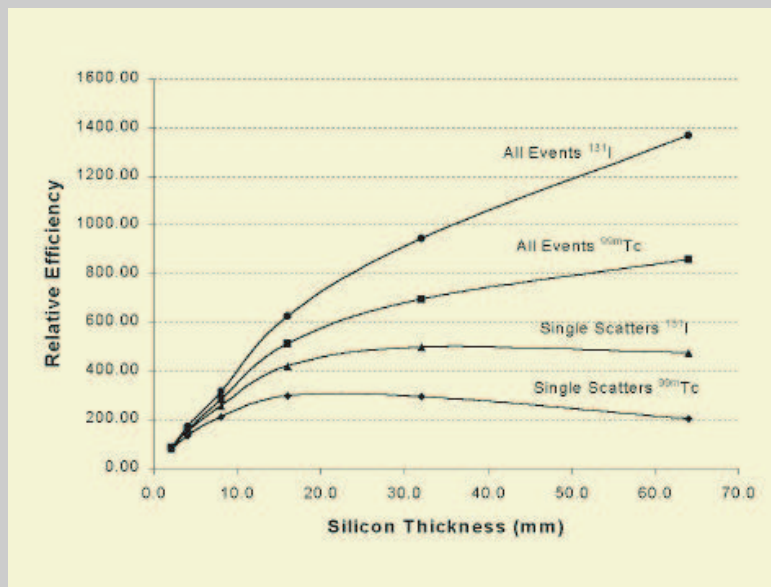
potrebnih več plasti

Debelejši moduli:

- večja V_{dep}
- potencialno večji I_{zap}
- za procesiranje potrebna ustrezna oprema

R&D: zaželeno vsaj 500 μm

Končni proizvod: cilj 1000-1500 μm

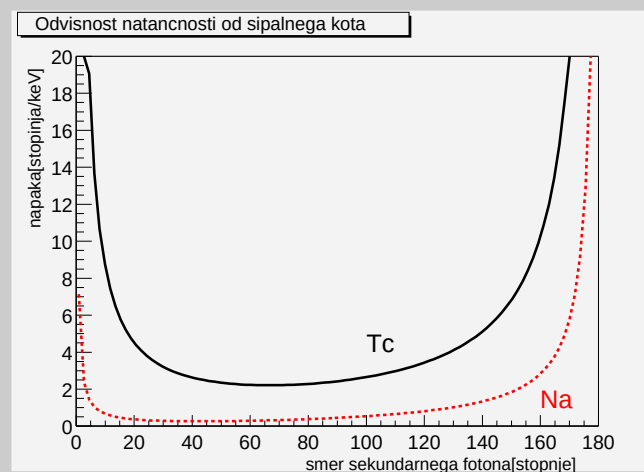
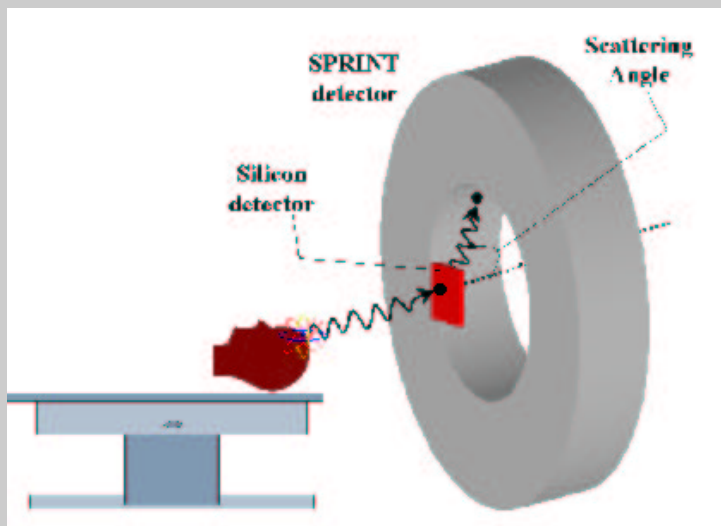


Izkoristek Si glede na kolimator za $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (140 keV) in ^{131}I (364 keV)



Geometrija detektorja: SPECT

- želimo se izogniti direktnim fotonom v scintilatorju (**visok rate**)
- želimo zajeti comptonso sipane fotone
- napaka na rekonstrukciji odvisna od sipalnega kota
- pokrivamo kote z majhno napako:
 - ^{99m}Tc (140 keV): 40° - $120^\circ \rightarrow 50\%$
 - ^{22}Na (511 keV): 20° - $140^\circ \rightarrow 80\%$

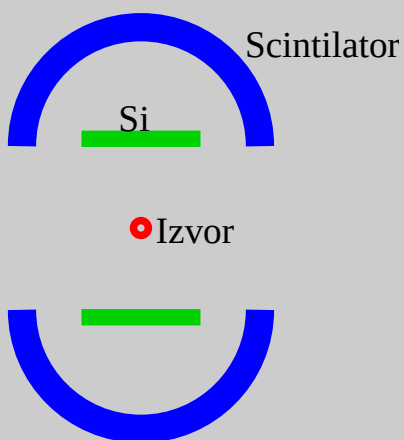
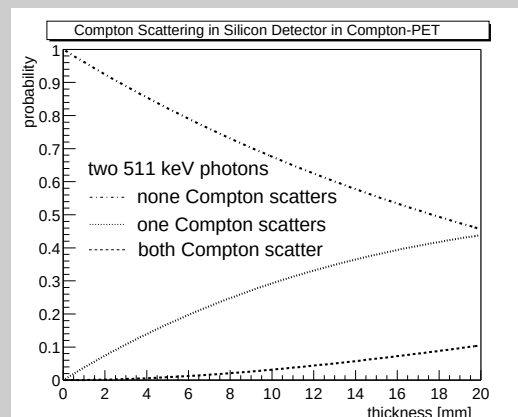




Geometrija detektorja: PET

Izhodiščne zahteve:

- čim večji izkoristek za dvojne Si zadeteke (VHR)
- ne želimo večkratnega sipanja v Si
- čim večji izkoristek za Si-scintilator zadeteke (GR)



Najugodnejša je 'geometrija gume'
(pokriva sipalne kote do 90°)



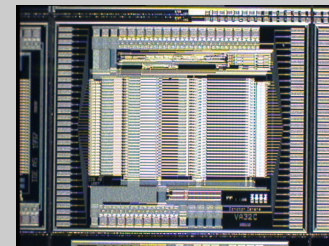
Silicij kot sipalni detektor: Čitalna elektronika

Zahteve za čitalno elektroniko:

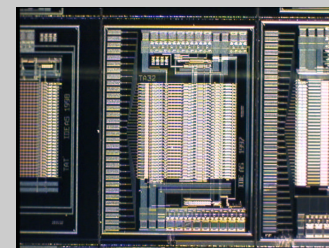
- nizek šum
- samostojno proženje
- hitrost

Čip VATA32C (VLSI CMOS, 32 kanalov):

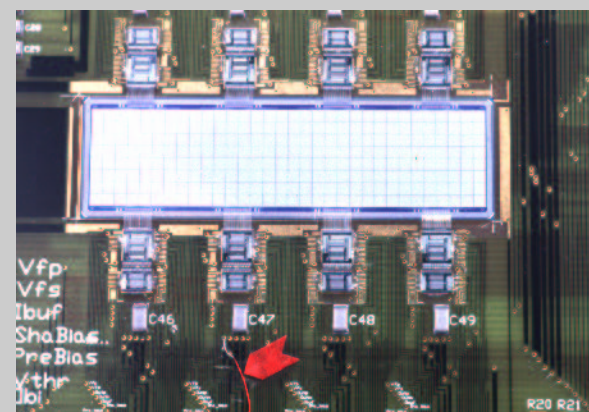
- VA32C
 - predojačevalec
 - počasni shaper ($\approx 2 \mu\text{s}$ peaking time)
 - sample-and-hold
 - multiplekser
- TA32CG
 - hitri shaper (75 ns peaking time)
 - diskriminator
 - nastavljivo ojačanje
 - nastavljen osnovni nivo
- načrovana širitev na 128 kanalov
- načrtovan prehod na $.35 \mu\text{m}$ tehnologijo
 - manjši tok v predojačevalniku $\rightarrow$ manjši šum?
 - manjša poraba $\rightarrow$ manjše gretje



VA32C



TA32CG



Detektor z elektroniko



Dosedanji rezultati: SPECT

Simulacija

Izkoristek nekaj $100\times$ večji od Angerjeve kamere

Decoding penalty (rekonstruiramo plašč stožca in ne linijo)

- Raste z velikostjo slikanega predmeta
- Pada z izboljšano energijsko ločljivostjo
- Pada z energijo vpadnega fotona
- Decoding penalty za disk z $r=7.5$ cm:
 - ^{99m}Tc , $\Delta E_{det}=750$ eV: ≈ 40
 - ^{99m}Tc , $\Delta E_{det}=0$ eV: ≈ 20
 - ^{364}I , $\Delta E_{det}=750$ eV: ≈ 1



Pričakujemo opazno izboljšanje glede na Angerjevo kamero.



Eksperimentalni sistem C-SPRINT

Si: blazinice $1.4 \times 1.4 \text{ mm}^2$, $d=300 \text{ }\mu\text{m}$,
 $\Delta E_{det} \approx 2 \text{ keV}$

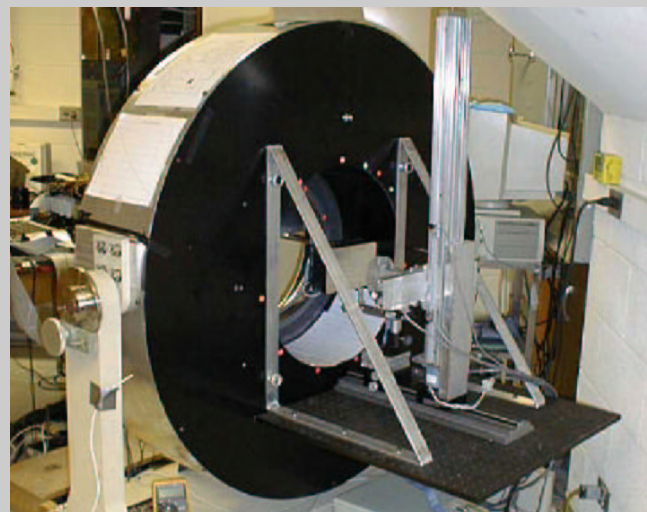
Scintilator: obroč obstoječega SPECT sistema z odstranjenim kolimatorjem (geometrija ni optimizirana)

Ločljivost za ^{99m}Tc točkovni izvor $\approx 1.4 \text{ mm}$ FWHM.

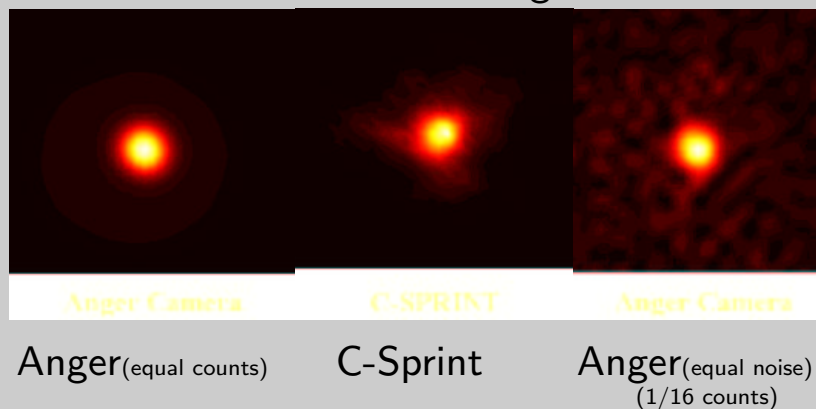
Rezultati za opisani sistem slabši kot za Angerjevo kamero.

Ujemanje s simulacijo:

- zadovoljivo ujemanje izkoristka
- dobro ujemanje prostorske ločljivosti



slike ^{99m}Tc točkovnega izvora





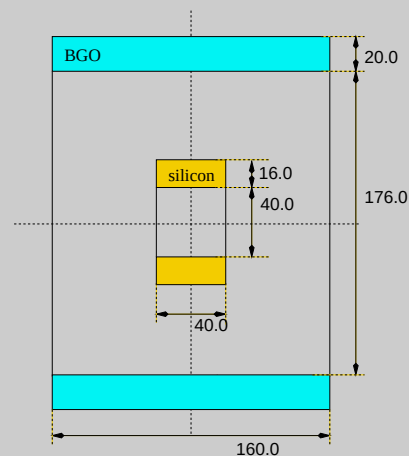
Dosedanji rezultati: PET



Simulacija

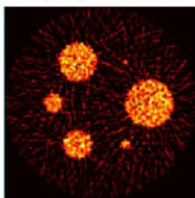
Si: obroč $2R=40\text{ mm}$, $l=40\text{ mm}$, $d=16\text{ mm}$,
granulacija $0.3 \times 0.3 \times 1\text{ mm}^3$

Scintilator (BGO): obroč $2R=176\text{ mm}$,
 $l=160\text{ mm}$, $d=20\text{ mm}$, granulacija $3 \times 3 \times 20\text{ mm}^3$



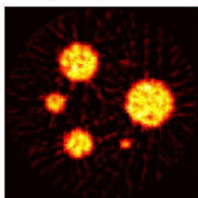
Si-Si

single/single, 0.3 mm pads



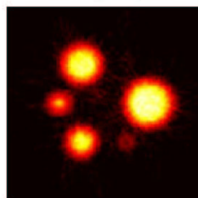
Si-BGO

single/BGO, 0.8 mm SR



BGO-BGO

BGO/BGO, 3 mm pixels



Ločljivost:

- Si-Si dogodki: opazno boljša od obstoječih VHR PET
- Si-BGO dogodki: nekoliko boljša od obstoječih VHR PET
- BGO-BGO dogodki: nekoliko slabša od obstoječih VHR PET

Izkoristek:

- Si-Si dogodki: nekoliko slabši od obstoječih VHR PET
- Si-BGO dogodki: nekoliko boljši od obstoječih VHR PET
- BGO-BGO dogodki: opazno boljši od obstoječih VHR PET

	Si-Si (VHR)	Si-BGO (HR)	BGO-BGO (LR)
Res. (FWHM)	190 μm	570 μm	1.75 mm
Izkoristek	1.1%	8.8%	20.8%



Eksperimentalni sistem

Si: 2 detektorja

- blazinice $1.4 \times 1.4 \text{ mm}^2$
- debelina $300 \text{ }\mu\text{m}$

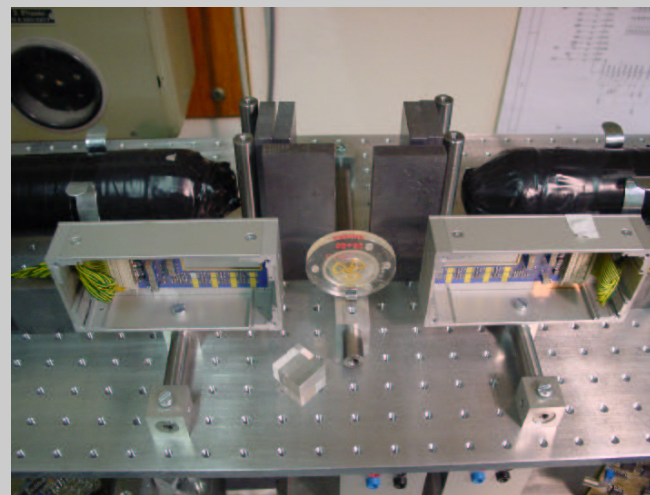
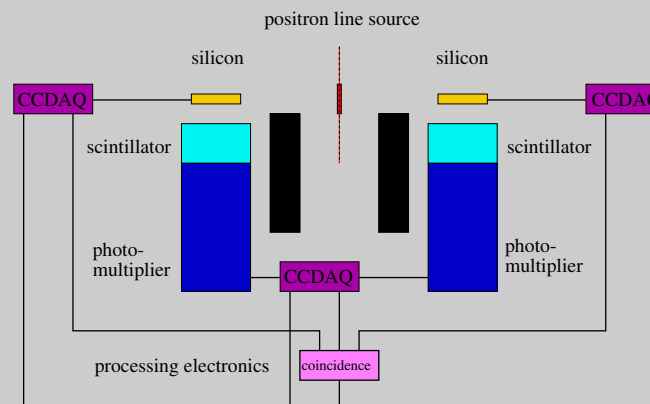
Scintilator: načrtovana 2 scintilatorja

- senčena pred izvorom
- v neposredni bližini Si

Meritve:

- $\Delta E_{det} = 2.45 \text{ keV}$
- Časovna ločljivost 1.9 ns FWHM

Drugi rezultati???





Načrti

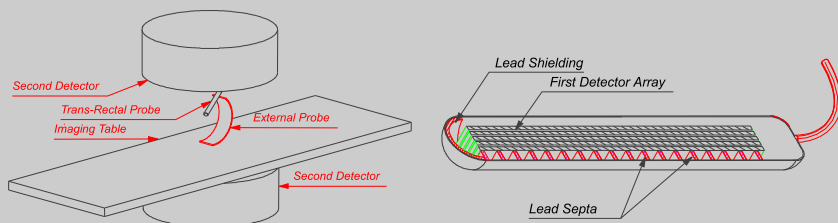


Dolgoročno razvoj usmerjen v izdelavo dveh specializiranih detektorjev:

- sonda za prostato
- VHR PET za male živali

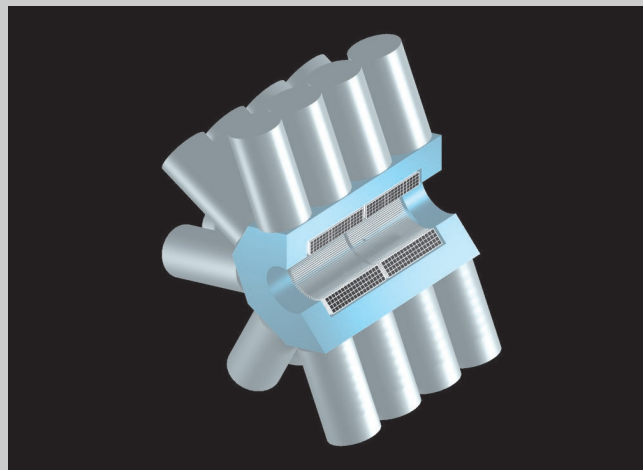
Sonda za prostato

- 1. faza: izgradnja in testiranje delujočega sistema
- 2. faza: optimizacija zlaganja Si senzorjev v sondi in izboljšanje hlajenja
- 3. faza: klinično testiranje
- 4. faza: komercializacija



VHR PET za male živali

- 1. faza: eksperimentalna potrditev koncepta
- 2. faza: izgradnja delujočega PET sistema
- 3. faza: izgradnja prototipa naprave
- 4. faza: komercializacija





Zaključek

Comptonova kamera ponuja možnost za **znantne izboljšave** slikanja v nuklearni medicini.

Izdelava konkurenčnega sistema še vedno predstavlja resen **tehnološki izziv**.

Trenutni načrti usmerjeni v **specializirane aplikacije**

- PET za male živali
- sonda za prostatu

Simulacije in prvi eksperimentalni rezultati kažejo, da so **zastavljeni cilji dosegljivi**.