



Akademickie Centrum Komputerowe

CYFRONET AGH

DZIEŃ OTWARTY

**Tomograf J-PET i HPC
w zintegrowanym ekosystemie:
nowoczesny system detekcyjny
do zastosowań medycznych
i badawczych**

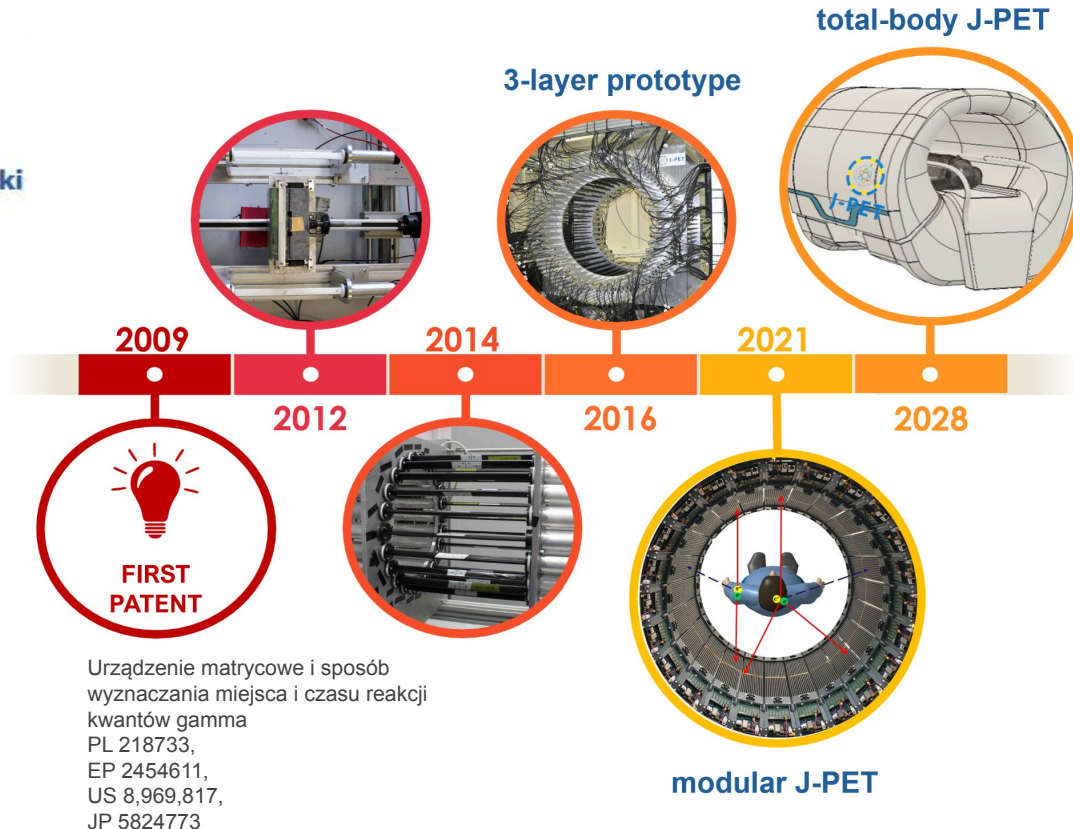
Bartłomiej Rachwał, WFILS AGH
24.11.2025



W kierunku pozytonowej tomografii emisyjnej całego ciała



AGH
WYDZIAŁ FIZYKI
I INFORMATYKI STOSOWANEJ



MNiSW
IAL/SP/596235/2023
*Tomograf J-PET/CT
do jednoczesnego
obrazowania całego
ciała*

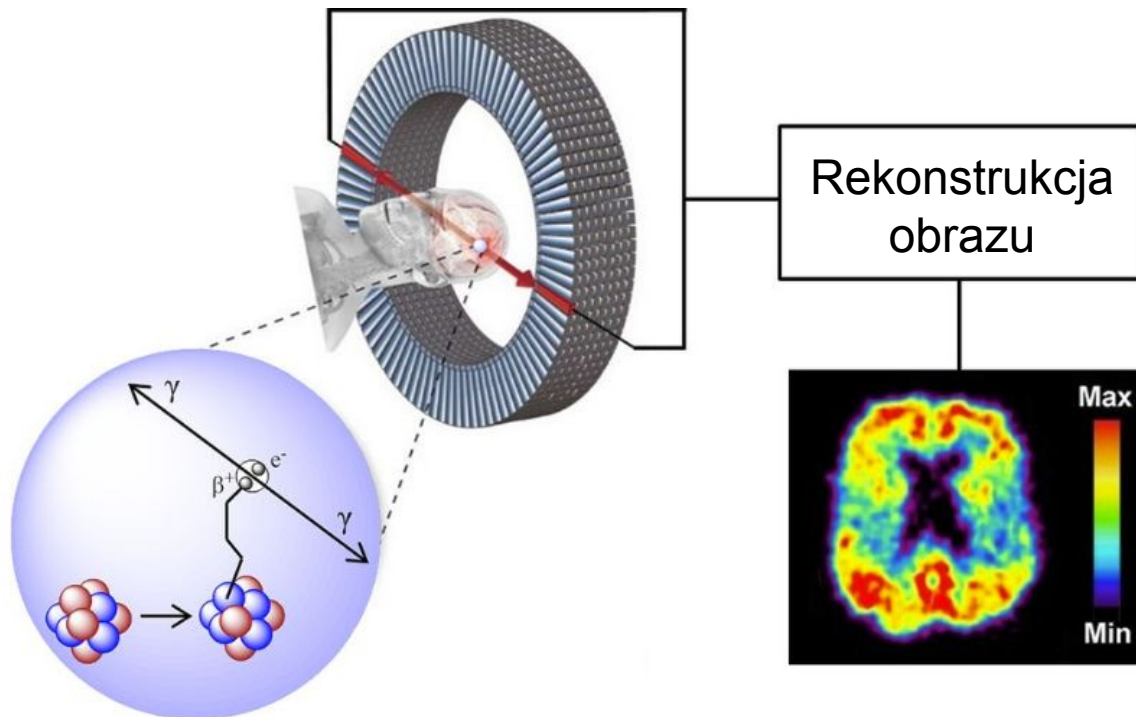
EU ERC
*Możliwość wykrywania
utlenienia tkanek przy
użyciu pozytonium*

...

<https://centhe.id.uj.edu.pl/grants>

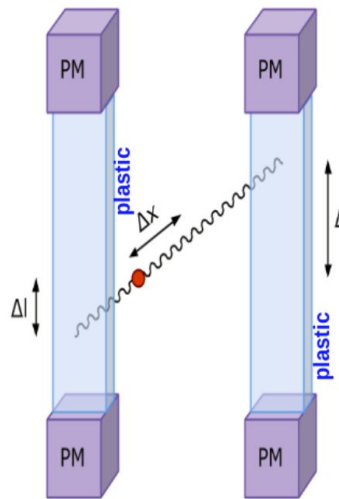
Standardowy PET

- Obrazowanie metaboliczne z 2-fotonową anihilacją.
- Scyntylatory krystaliczne.
- Zasada koincydencji dwóch fotonów 511 keV, mierząc ich linię prostej (LOR – line of response).
- Jeśli występują dodatkowe fotony system nie potrafi ich poprawnie powiązać z LOR - traktowanie jako szum.

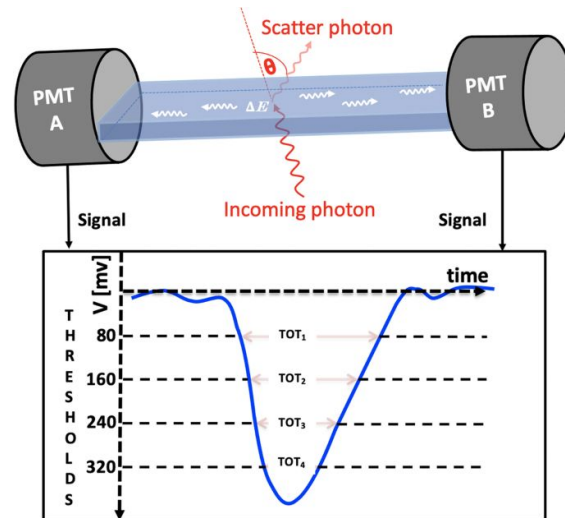


Podejście J-PET

- Obrazowanie metaboliczne z 2-fotonową anihilacją.
- Scyntylatory **plastikowe**.
- Informacja o miejscu interakcji fotonu gamma w detektorze na podstawie czasu (TOF), a nie pomiaru energii fotonu.
- Jeśli występują **dodatkowe fotony (>2)** system potrafi je poprawnie zrekonstruować.
- **diagnostyka patologii tkankowych** (parametry pozytonium: czas życia, stosunek $3\gamma/2\gamma$)



P. Moskal et al., *Acta Phys. Polon. B47* (2016) 509;



S. Sharma, et al., *EJNMMI Phys.* **10**(28) (2023), DOI: 10.1186/s40658-023-00546-7

Czas powyżej progu (Time Over Threshold, TOT) sygnałów PMT z paska scyntylatora odpowiada energii zdeponowanej przez γ

Pozytonium



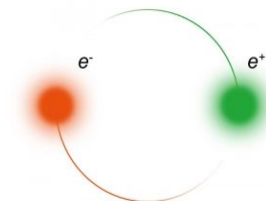
- **Para-pozytonium (p-Ps)**
 - stan singletowy, $\tau = 125 \text{ ps}$
 - anihilacja 2γ
- **Orto-pozytonium (o-Ps)**
 - stan trypletowy, $\tau = 142 \text{ ps}$
 - anihilacja 3γ
 - konwersja do p-Ps, następnie anihilacja 2γ
 - pick-off process
 - o-Ps w interakcji z e^- otoczenia $\rightarrow 2\gamma$

badania fundamentalne

Detektor J-PET umożliwia rejestrację wielu fotonów z wysoką rozdzielczością czasową i kątową, otwiera drogę do **testowania fundamentalnych symetrii fizycznych CP, T i CPT w układzie leptonowym**. Dotychczasowe eksperymenty ograniczyły możliwe naruszenia tych symetrii jedynie do poziomu około 0.3%, co jest o wiele rzędów wielkości mniej czułe niż precyzja osiągnięta w sektorze kwarkowym.

P. Moskal et al., *Nature Communications* **12**, 5658 (2021)

P. Moskal et al., *Nature Communications* **15**, 78 (2024)



obrazowanie medyczne

Czas życia ortho-pozytonium (o-Ps) oraz stosunek anihilacji $3\gamma/2\gamma \Rightarrow$ wskaźnik diagnostyczny w obrazowaniu PET do **oceny patologii tkanek *in vivo* na poziomie molekularnym**, a tym samym określenia stopnia złośliwości nowotworu bez wykonywania biopsji.

P. Moskal, E. Stępień, *PET Clinics* **15** (2020) 439, DOI: 10.1016/j.cpet.2020.06.009

P. Moskal, et al., *Science Advances* **2021**; 7 : eabh4394

P. Moskal, et al., *Science Advances* **2024**; 10 : eadp2840

Dzięki unikalnej geometrii i wysokiej rozdzielczości czasowej detektora, możliwe jest dla o-Ps:

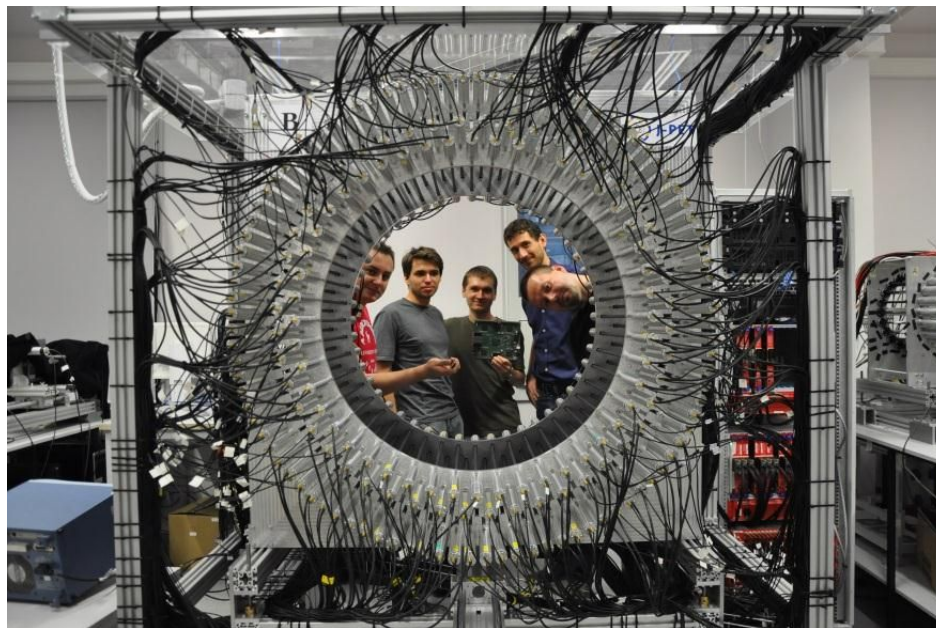
- Precyzyjna rekonstrukcja trajektorii i momentów pędu fotonów 3γ ,
- Badanie korelacji polaryzacji fotonów w przestrzeni i czasie,
- Ocena stopnia splątania kwantowego w systemach leptonowych otwiera drogę do eksperymentów **quantum information *in vivo***. Potencjał do zastosowania w diagnostyce wirtualnej biopsji, łącząc **fizykę kwantową z obrazowaniem medycznym**.

P. Moskal, *Physics* **17** (2024) 138

P. Moskal et al, *Science Advances* **11**, (2025) eads3046

Detektor 3 layer J-PET

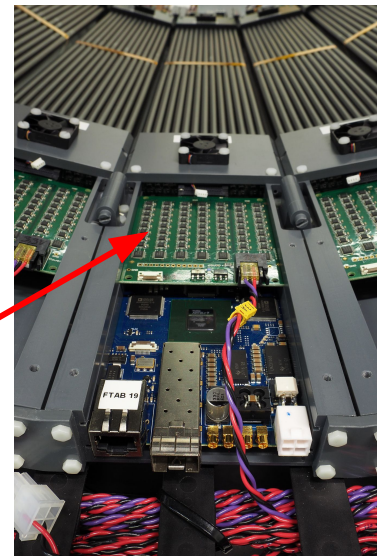
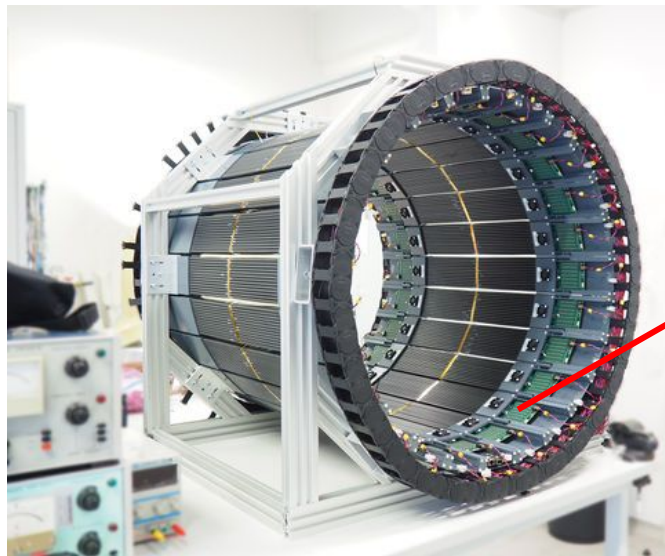
- 3 warstwy, 192 scyntylatory EJ-230:
 $7 \times 19 \times 500 \text{ mm}^3$,
- Promień: 85 cm,
- 384 fotopowielacze R9800, 1536 kanałów,
- Plastikowe scyntylatory
– niewielkie tłumienie światła,
- Dedykowana cyfrowa elektronika
wieloprogowa (dokładność czasowa 30 ps),
- **DAQ bez wyzwalacza (trigger-less),**
- Rozdzielczość czasu oddziaływania: $\sim 250 \text{ ps}$,
- Rozdzielczość kątowna: $\sim 1^\circ$



P. Moskal et al., *Acta Phys. Polon. B47* (2016) 509;
G. Korcyl, et al., *IEEE Trans. Med. Imag.* 37, 2526 (2018)

Detektor modułowy

- Modułowa konstrukcja:
24 moduły – każdy po 13 pasków (łącznie 312 pasków)
- Średnica: 74 cm,
- Pole widzenia (FOV): 50 cm,
- 4 SiPM na każdej stronie scyntylatora
- Plastikowe scyntylatory –
niewielkie tłumienie światła
- 2 progi stałe na każdy SiPM,
- DAQ bez wyzwalacza (trigger-less),
- Cyfrowe dane na wyjściu modułu,
- Rozdzielczość czasu oddziaływania:
 ~ 250 ps,
- Rozdzielczość kątowna: $\sim 0,4^\circ$

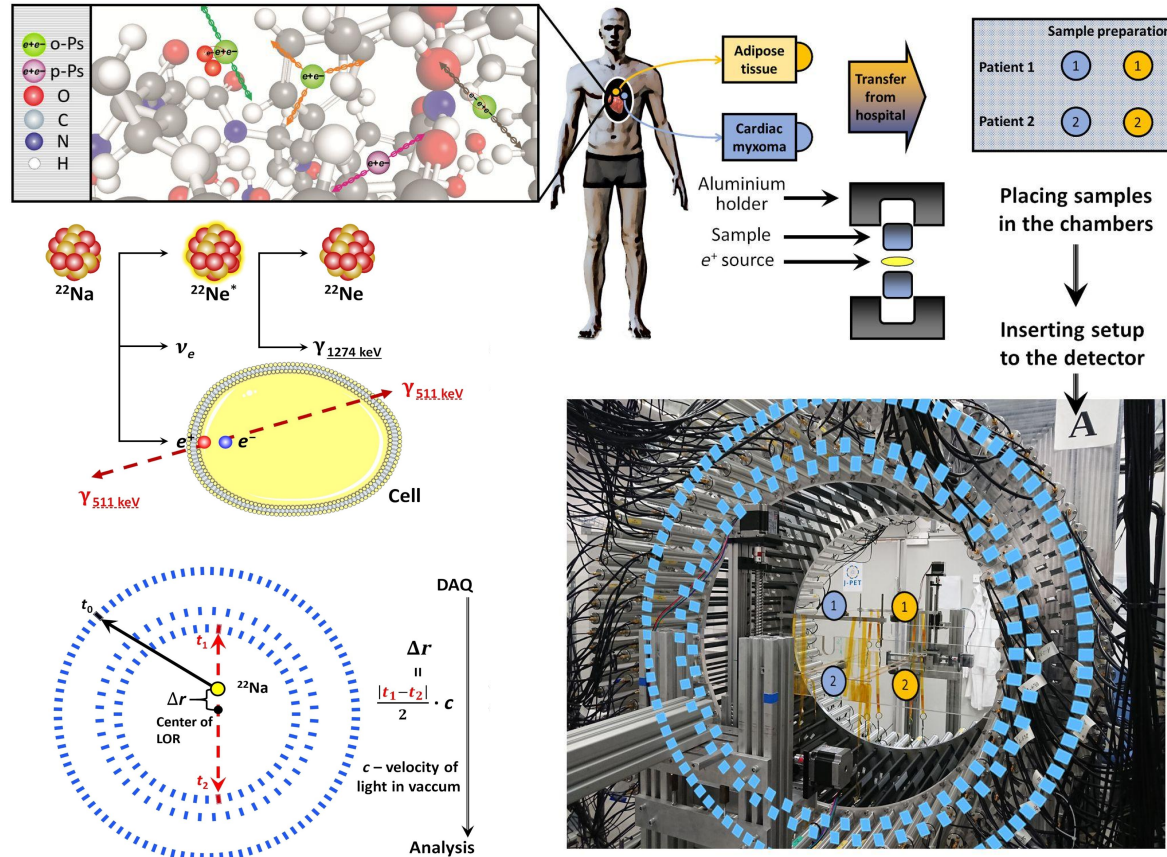


P. Moskal et al., *Acta Phys. Polon. B47* (2016) 509;
G. Korcyl, et al., *IEEE Trans. Med. Imag.* 37, 2526 (2018)

Obrazowanie pozytonium przy użyciu nowego skanera PET wielofotonowego

P. Moskal, et al., *Science Advances* 2021; 7 : eabh4394

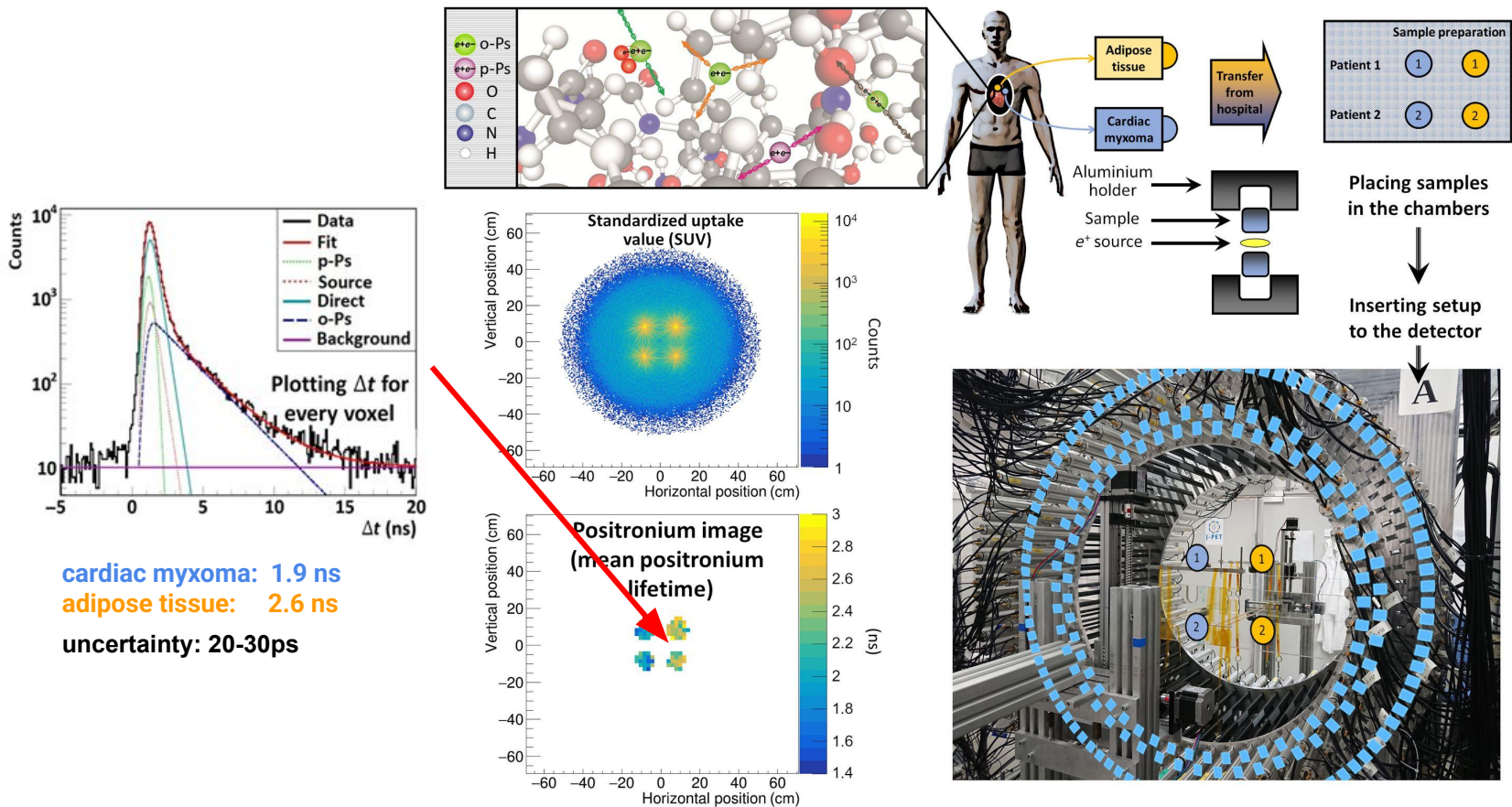
badania *ex-vivo*



Obrazowanie pozytonium przy użyciu nowego skanera PET wielofotonowego

P. Moskal, et al., *Science Advances* 2021; 7 : eabh4394

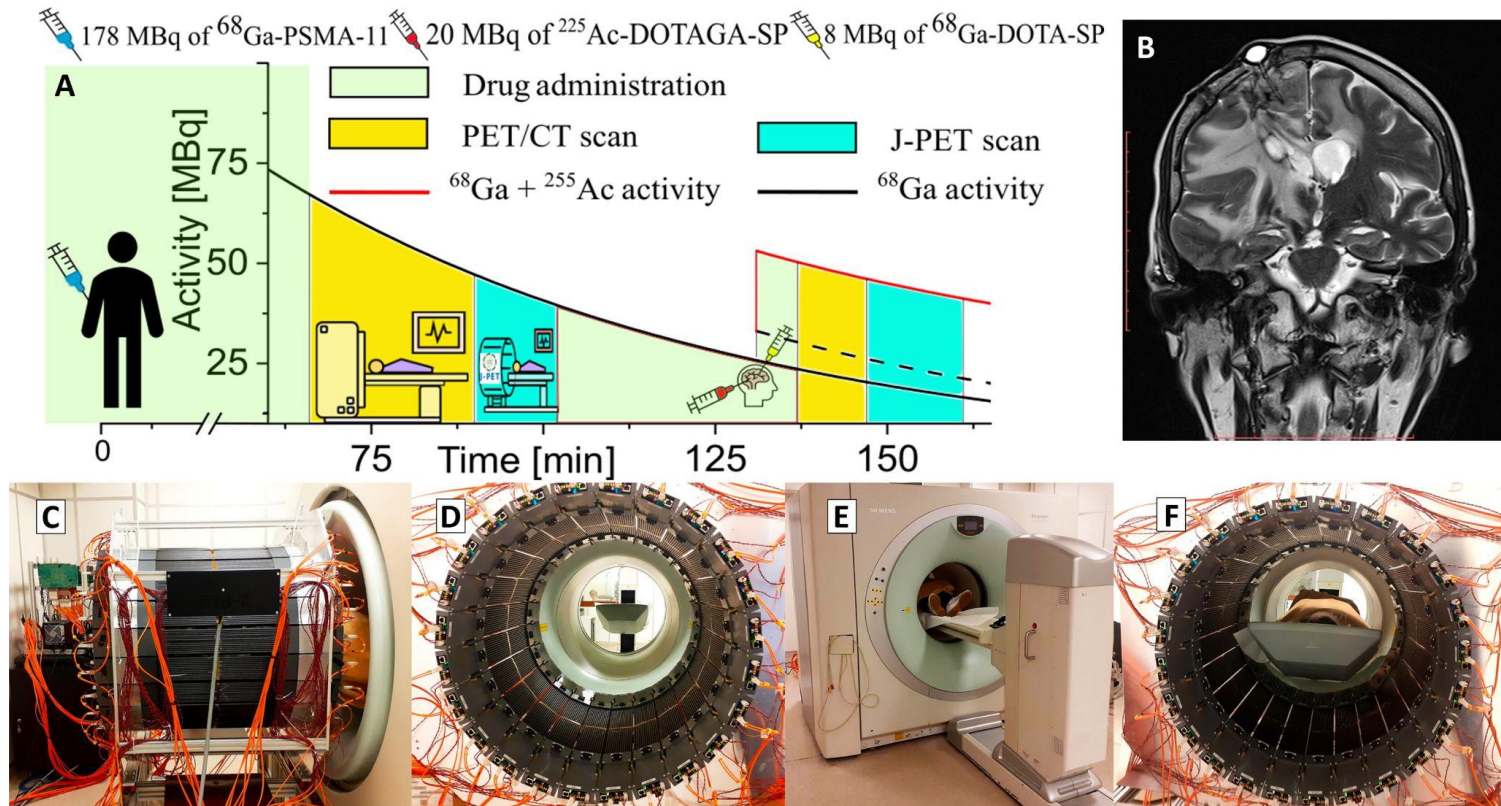
badania *ex-vivo*



Obrazowanie pozytonium ludzkiego mózgu *in vivo*

Bioethical Committee consent no. KB/16/2022

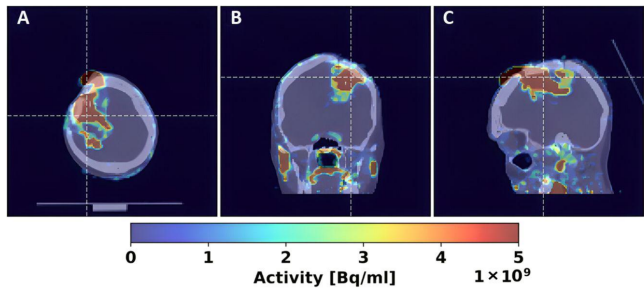
P. Moskal, et al., **Science Advances** 2024; 10 : eadp2840



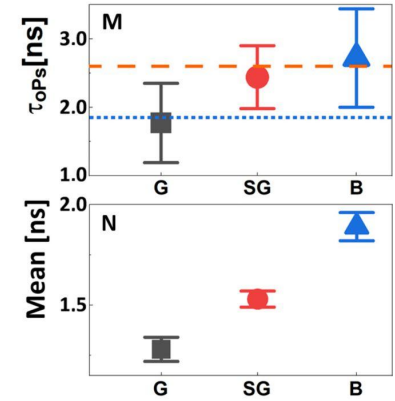
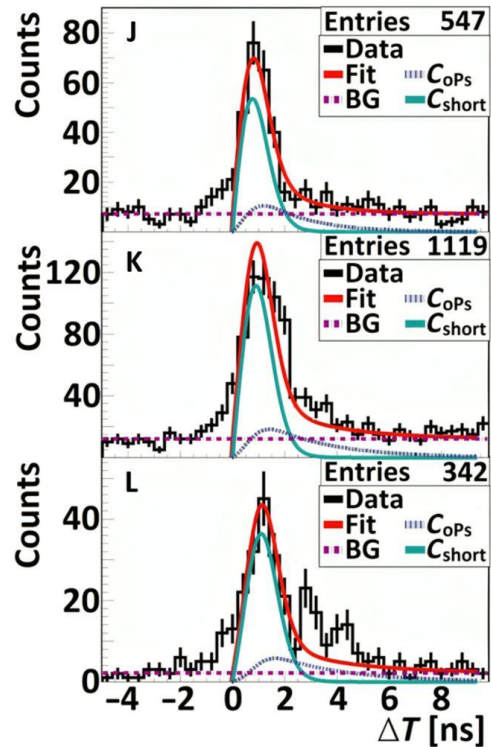
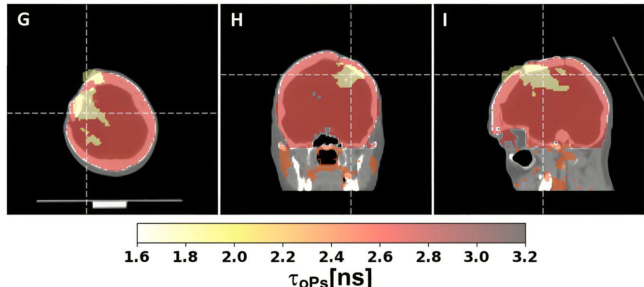
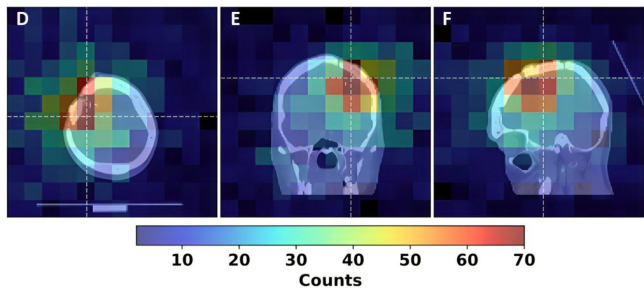
Obrazowanie pozytonium ludzkiego mózgu *in vivo*

Bioethical Committee consent no. KB/16/2022
P. Moskal, et al., *Science Advances* 2024; 10 : eadp2840

Standard PET/CT



J-PET



Tkanka	τ_{oPs} [ns]
Glejak (glioma cancer)	1.77 ± 0.58
Gruczoły ślinowe (salivary glands)	2.44 ± 0.46
Zdrowa tkanka mózgu	2.72 ± 0.72

Akwizycja danych: Trigger-less DAQ

- Brak klasycznego wyzwalacza (tzw. trigger)
→ zapisujemy cały surowy strumień TDC.
- Obecna wersja danych:
 - ID kanału,
 - Czas rejestracji,
 - Stan logiczny (Lead / Trail)
- Dane zapisujemy w oknach czasowych 50 μ s.
- Nie stosujemy filtracji ani koincydencji na poziomie sprzętowym.

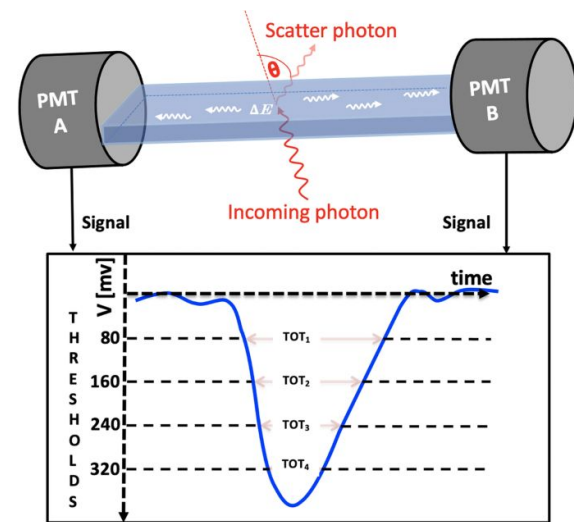
Standardowy PET zapisuje zwykle już sparowane zdarzenia (events ~ koincydencje).

W **J-PET** liczba rekordów jest więc znacznie większa, bo mamy dostęp do wszystkich pojedynczych sygnałów (surowych danych).

Możliwość elastycznego podejścia w rekonstrukcji:
od pojedynczych sygnałów (hits) po koincydencje (events).

Wyzwania:

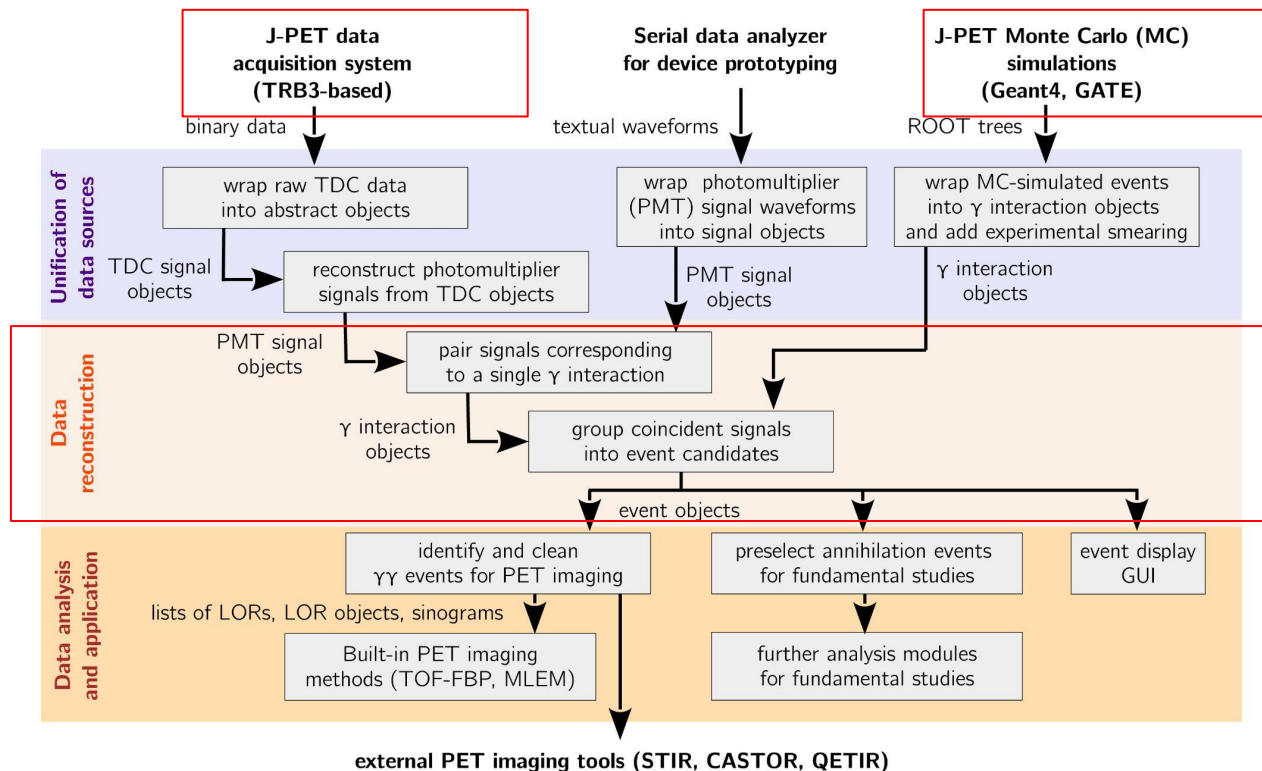
- Oprogramowanie
- Magazyn danych
- Moc obliczeniowa



S. Sharma, et al., *EJNMMI Phys.* 10(28) (2023),
DOI: 10.1186/s40658-023-00546-7

J-PET Framework: Software platform for PET tomography data reconstruction and analysis

W. Krzemiński et al. **SoftwareX** 11 (2020) 100487, <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100487>





2023: 1.3 PB

2024: 0.8 PB

2025: 2.0 PB

Przechowywanie danych
na taśmach LTO



Biblioteki taśmowe

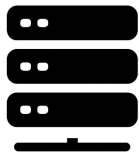
Object Storage

Scratch realizowane
przez Lustre

GROUP STORAGE

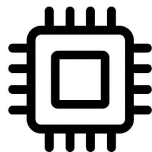


Moc obliczeniowa



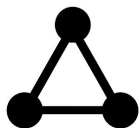
HPC (High-Performance Computing)

– nastawione na szybkie, intensywne obliczenia w krótkim czasie, często do symulacji i modelowania złożonych systemów.



HTC (High-Throughput Computing)

– skupia się na maksymalnej liczbie zadań przetwarzanych w długim czasie, idealne do dużych ilości niezależnych obliczeń.



MTC (Many-Task Computing)

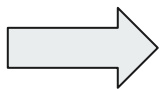
– łączy cechy obu powyższych, obsługuje dużą liczbę zadań o krótkim czasie trwania, często z zależnościami między zadaniami



Computational grant no.
PLG/2024/017688 w trakcie rozliczania
PLG/2025/018762 aktywny



Data on
tapes



S3 Podole

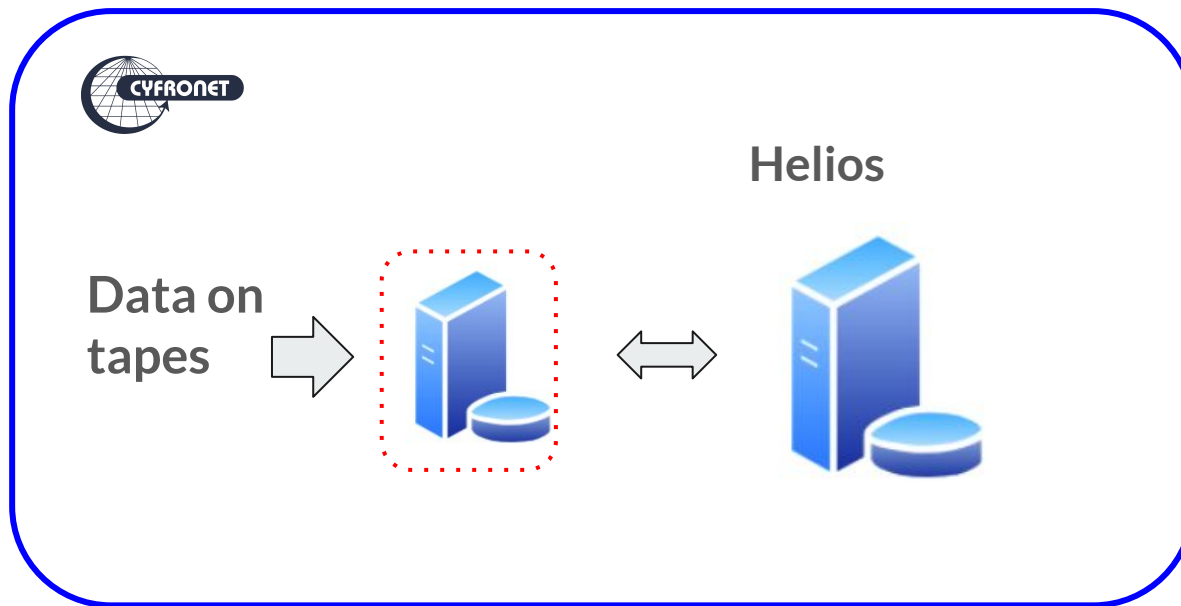
Ares / Helios



Computational grant no.

PLG/2024/017688 w trakcie rozliczania

PLG/2025/018762 aktywny

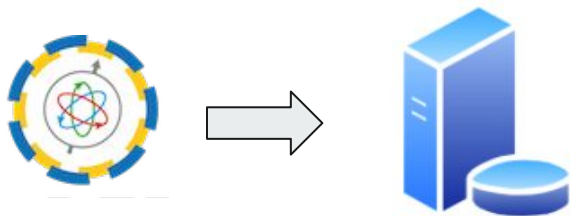


Computational grant no.

PLG/2024/017688 w trakcie rozliczania

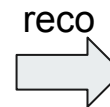
PLG/2025/018762 aktywny

WFAiS UJ
/ Theranostic centre



Helios

S3



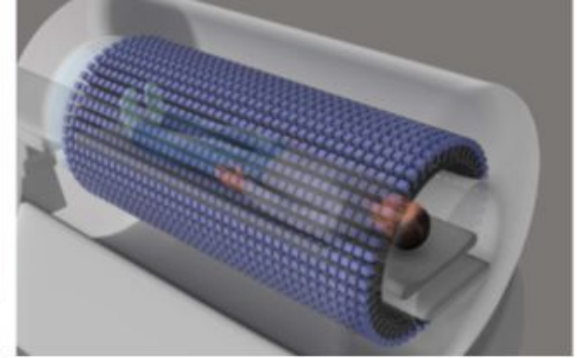
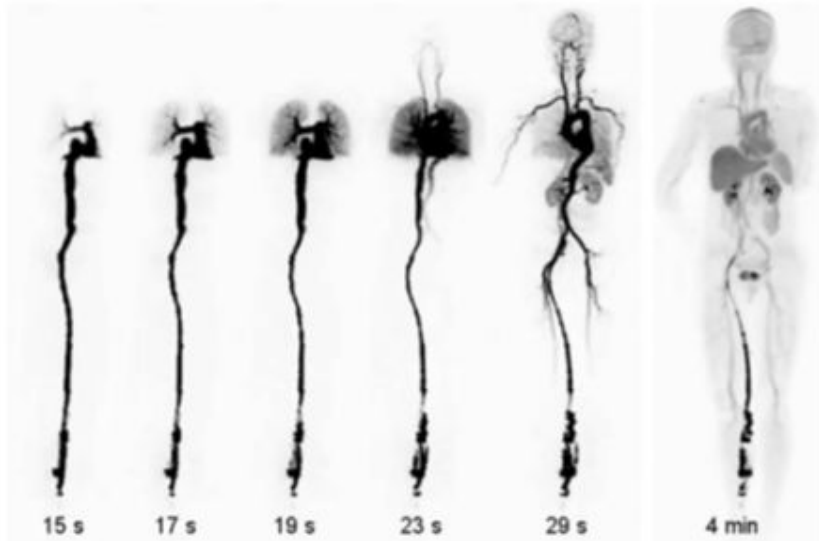
Tapes

Dokąd zmierzamy

Number of PET scanners per million people

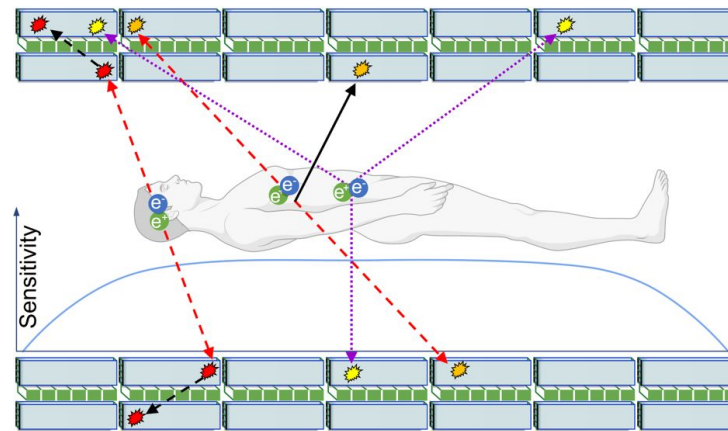
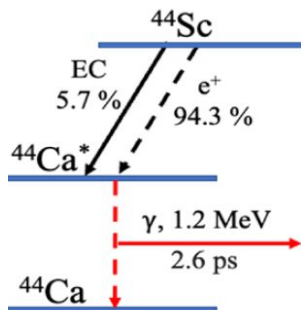
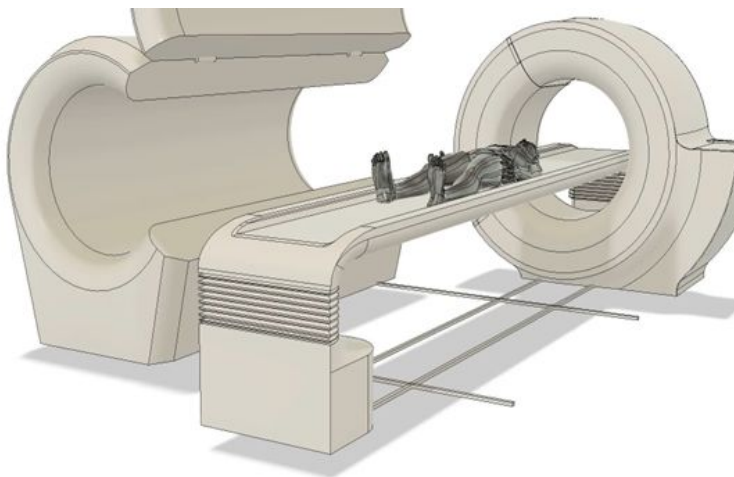


Konwencjonalnie: Tomograf pozytonowy obejmujący całe ciało pacjenta



First Human Imaging Studies with the EXPLORER Total-Body PET Scanner
EXPLORER TB-PET: R. D. Badawi et al. J. Nucl. Med. 60 (2019) 299

J-PET: Tomograf pozytonowy obejmujący całe ciało pacjenta



S. D. Bass, S. Mariuzzi, P. Moskal, E. Stepien,

Rev. Mod. Phys. 95 (2023) 021002

Positronium physics and biomedical applications



Obrazowanie pozytonium *in vivo*.

TB-J-PET + ^{44}Sc → obrazowanie pozytonium
o czułości większej tysiące razy w porównaniu
do klasycznych PET

Dziękuję za uwagę!



WYDZIAŁ FIZYKI
I INFORMATYKI STOSOWANEJ

