



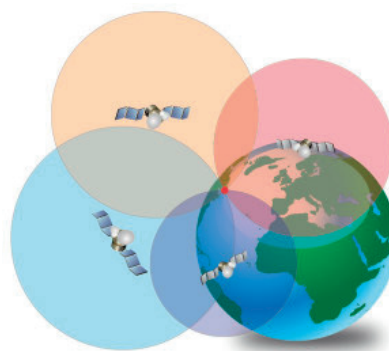
PET a GPS, czyli o trilateracji słów kilka

Eryk Czerwiński

Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Jagielloński w Krakowie,
ul. Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków, tel. +48 12 664 48 90, e-mail: eryk.czerwinski@uj.edu.pl

W ilu punktach przecinają się 4 sfery?

Wyznaczanie miejsca pewnego zdarzenia można stosunkowo łatwo przeprowadzić, jeżeli znana jest trajektoria elementów, które brały udział w tym zdarzeniu, np. ślady naładowanych cząstek potomnych pochodzących z rozpadu cząstki pierwotnej można zmierzyć w detektorze i poprzez ich ekstrapolację do punktu przecięcia wyznaczyć miejsce rozpadu; w innej sytuacji znajomość kierunku rozchodzenia się czoła fali pozwala na określenie np. miejsca wrzucenia przedmiotu do wody. Problem staje się bardziej skomplikowany, gdy kierunki emisji poszczególnych elementów (informacji) są nieznanne, np. odbiór sygnałów wysyłanych przez system nawigacji satelitarnej lub rejestracja fotonów z rozpadu stanu związanego elektronu i pozytonu (pozytonium). W tym pierwszym przypadku od dawna używa się trilateracji, czyli metody określania położenia na podstawie informacji na temat odległości (pomiędzy satelitą a odbiornikiem). Można to sobie wyobrazić jako wyznaczenie miejsca przecięcia 4 różnych sfer, w których środkach znajdują się satelity nawigacyjne. Ponieważ obszar przecięcia dwóch sfer jest okręgiem, tak więc przecięcie tego okręgu z trzecią i każdą kolejną sferą może dać dwa punkty, z których jeden, nieznajdujący się na powierzchni Ziemi, można bezpiecznie odrzucić. Idea wyznaczenia pozycji w systemach GPS przedstawiona została na rysunku 1. Główny problem polega jednak na tym, że promienie tych sfer są nieznanne. Dlatego konieczne są cztery satelity. Szczegółowe rozwiązanie tego zagadnienia zostanie przedstawione w dalszej części artykułu. Natomiast w dwóch ostatnich częściach przedstawiono opis metody oraz nowego typu detektora, które dają nadzieję na określanie nano-struktury nowotworów w oparciu o rejestrację czasu życia orto-pozytonium, gdzie jednym z kluczowych rozwiązań jest wykorzystanie zmodyfikowanej metody trilateracji.



Rys. 1 Idea trilateracji w GPS
Źródło: www.nuvation.com

Global Positioning System (GPS)

W trójwymiarowej przestrzeni do jednoznacznego wyznaczenia pozycji potrzebny jest sygnał z trzech satelitów. Sygnał taki zawiera w sobie m.in. informację o aktualnym położeniu satelity (środek sfery), czas wystąpienia sygnału (w połączeniu ze znanym czasem odbioru sygnału oraz wartością prędkości światła daje to informację o odległości – promieniu sfery) oraz znacznik czasu (do synchronizacji zegara odbiornika z atomowym zegarem satelity). Uzyskana dokładność wyznaczenia pozycji odbiornika nie jest jednak zadowalająca w powyższej metodzie m.in. ze względu na niewystarczającą dokładność wyznaczenia czasu. W związku z tym, do uwzględnienia stosownej poprawki używany jest sygnał z czwartej satelity. W ogólności nieznanne cztery parametry (3 współrzędne przestrzenne odbiornika oraz czas wystąpienia sygnału z satelity) można otrzymać poprzez rozwiązanie układu czterech równań sfer. Należy tutaj podkreślić, że to rozwiązanie pozwala otrzymać czas wystąpienia sygnału równocześnie ze współrzędnymi przestrzennymi. Dokładnie ta właściwość metody wykorzystanej w GPS pozwala na jej wykorzystanie w pozytonowej tomografii emisyjnej.



Pozytonium w tomografii pozytonowej emisyjnej

Powszechnie stosowana obecnie pozytonowa tomografia emisyjna (PET) pozwala na określenie miejsca oraz rozmiaru nowotworu. Podany pacjentowi radiofarmaceutyk (najczęściej fluorodeoksyglukoza) zgodnie z mechanizmem Warburga gromadzony jest głównie w komórkach nowotworu. Następnie pozytony pochodzące z rozpadu fluoru ulegają anihilacji z napotkanym elektronem na dwa kwanty gamma o energii 511 keV rozchodzące się pod kątem 180° . Typowy tomograf PET zbudowany z pierścienia kryształów detekcyjnych pozwala zarejestrować te dwa kwanty gamma, a zatem zrekonstruować linię, wzdłuż której zostały one wyemitowane podczas anihilacji. W uproszczeniu, punkt, a właściwie obszar, który powstał z przecięcia takich linii, odpowiada położeniu nowotworu.

Obecne tomografy wykorzystują anihilację par elektron – pozyton na dwa kwanty gamma, ale anihilacja może również zachodzić na trzy lub więcej kwantów gamma. Może ona zachodzić bezpośrednio lub z wytworzeniem atomów pozytonium. W przypadku, gdy pozyton z elektronem utworzą najpierw orto-pozytonium (stan trypletowy z równoległym ustawieniem spinów), anihilacja nastąpi na trzy lub z mniejszym prawdopodobieństwem na większą, nieparzystą liczbę kwantów gamma ze względu na zachowanie liczb kwantowych. Stan singletowy (para-pozytonium) rozpadający się na parzystą liczbę kwantów gamma powstaje czterokrotnie rzadziej. Można oczekiwać, że wykorzystanie informacji pochodzącej z trzech kwantów gamma pozwoliłoby na dokładniejsze wyznaczenie miejsca anihilacji.

Czas życia o-Ps w próżni wynosi 142 ns i maleje do kilku nanosekund w przestrzeniach międzykomórkowych, co jest spowodowane m.in. obecnością elektronów w komórkach. W przestrzeniach międzykomórkowych średnia gęstość elektronów będzie niższa, tak więc czas życia orto-pozytonium w tych obszarach będzie zależał od ich rozmiarów – w większych wolnych przestrzeniach jest mniejsze prawdopodobieństwo anihilacji pozytonu z o-PS z elektronem z otoczenia, a zatem dłuższy czas życia orto-pozytonium [1].

Jagielloński Pozytonowy Tomograf Emisyjny (J-PET)

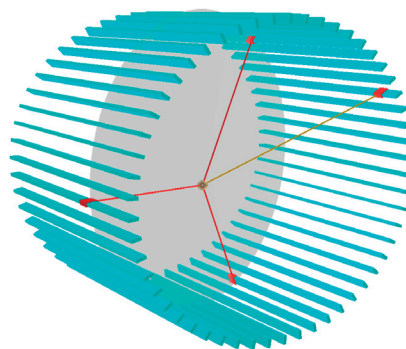
Obecnie na Wydziale Fizyki, Informatyki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego powstał nowy typ tomografu PET [2-4]. Jego nowatorski charakter polega na wykorzystaniu scyntylatorów polimerowych zamiast kryształów nieorganicznych jako elementów czynnych detektora (rejestracja kwantów gamma w oparciu o rozproszenie Comptona zamiast efektu fotoelektrycznego) oraz dedykowanej elektroniki odczytu (dokładny pomiar czasu szybkich sygnałów ze scyntylatorów) [5]. Rozwiązanie to pozwala na jednoczesne zmniejszenie kosztów urządzenia (30-80 razy tańszy 1 cm^3 elementu czynnego detektora) oraz zwiększenie rozmiarów tomografu (beczka o długości 50 cm zamiast pierścienia o szerokości 20 cm). Ponadto pozwala na zbudowanie (bez zmiany kosztów) tomografu o polu

widzenia umożliwiającym jednorazowy pomiar całego ciała pacjenta zamiast kilkustopniowego skanu.

Dzięki J-PET możliwy jest pomiar czasu i miejsca uderzenia w detektor [6-8] trzech kwantów gamma pochodzących z anihilacji o-Ps. W tej sytuacji środek sfery odpowiada zrekonstruowanemu miejscu interakcji kwantu gamma z detektorem, natomiast powierzchnia sfery odpowiada punktom, z których mógł być wyemitowany zarejestrowany kwant. W stosunku do GPS sytuacja jest o tyle odwrotna, że kwanty gamma są emitowane z punktu przecięcia sfer do ich środków, natomiast sygnał GPS z satelitów jest wysyłany ze środków sfer do punktu ich przecięcia. Należy jednak zwrócić uwagę, że w przypadku anihilacji o-Ps kwanty gamma z anihilacji poruszają się w jednej płaszczyźnie ze względu na zasadę zachowania pędu. Pozwala to wyznaczyć miejsce anihilacji jako punkt przecięcia trzech okręgów na płaszczyźnie emisji. Jest to unikatowa własność układu J-PET w stosunku do używanych obecnie tomografów [9]. Wykorzystanie podejścia stosowanego w GPS zostało pierwotnie użyte przez krakowskich fizyków w eksperymencie KLOE z dziedziny fizyki cząstek elementarnych [10, 11].

Warto również podkreślić, że w przypadku wykorzystania ^{44}Sc jako źródła pozytonów możliwy jest pomiar czasu życia orto-pozytonium. Czas anihilacji o-Ps otrzymywany jest wprost metodą opisaną powyżej, natomiast czas powstania pozytonium można otrzymać z pomiaru dodatkowego kwantu gamma pochodzącego z de-ekscytacji $^{44}\text{Ca}^*$. Czas życia wzbudzonego wapnia wynosi 2.9 ps, natomiast czas termalizacji pozytonu jest mniejszy niż 10 ps [12]. Ponieważ czas życia o-Ps jest rzędu ns, to oba te przyczynki można zaniedbać. Powstanie o-Ps jest zatem związane z emisją kwantu gamma, a rozpad o-Ps z emisją trzech kwantów gamma w jednej płaszczyźnie. W związku z wcześniejszą termalizacją pozytonu można również przyjąć, że wszystkie cztery kwanty gamma są emitowane z tego samego miejsca. Radiofarmaceutyki na bazie skandium opracowywane są w Środowiskowym Laboratorium Ciężkich Jonów Uniwersytetu Warszawskiego [13], a czas życia ^{44}Sc wynoszący 3.9 h pozwalałby dostarczać je do szpitali w całej Polsce.

Na rysunku 2 przedstawiono schematycznie jedną warstwę scyntylatorów detektora J-PET oraz trajektorie czterech zarejestrowanych kwantów gamma.



Rys. 2 Idea pomiaru rozpadu o-Ps detektorem J-PET z wykorzystaniem źródła ^{44}Sc . Błękitnym kolorem oznaczono scyntylatory jednej warstwy detekcyjnej. Czerwone linie odpowiadają trajektorii trzech (współpłaszczyznowych) kwantów z anihilacji o-Ps, natomiast linia żółta oznacza kwant z deekscytacji $^{44}\text{Ca}^*$.

Źródło: Schemat dzięki uprzejmości A. Gajosa.



Podsumowanie

Wykorzystanie trilateracji używanej powszechnie w systemie GPS do analizy danych zebranych z zastosowaniem nowego detektora J-PET pozwala na wykorzystanie orto-pozytonium do wyznaczenia miejsca anihilacji w pozytonowej tomografii emisyjnej i jednocześnie umożliwia wyznaczenie struktury w skali nanometrów obserwowanego nowotworu.

Literatura

1. R. Pietrzak et al.: *Influence of neoplastic therapy on the investigated blood using positron annihilation lifetime spectroscopy*, Nukleonika, 58, 2013, 199.
2. P. Moskal, et al.: *TOF-PET detector concept based on organic scintillators*, Nucl. Med. Rev., 15, 2012, C81-C84.
3. P. Moskal: *Strip device and the method for the determination of the place and response time of the gamma quanta and the application of the device for the Positron Emission Tomography*, Patent number: WO2011008119-A2, PL388555-A1, US2012112079-A1, EP2454612-A2, JP201253734-W.
4. P. Moskal, et al., *Test of a single module of the J-PET scanner based on plastic scintillators*, Nucl. Instrum. Meth., A764, 2014, 317-321.
5. G. Korcyl et al.; *Trigger-less and reconfigurable data acquisition system for positron emission tomography*, Bio-Algorithms and Med-Systems, 10, 2014, 37.
6. P. Moskal, G. Moskal, I. Moskal: *TOF-PET tomograph and a method of imaging using a TOF-PET tomograph, based on a probability of production and lifetime of a positronium*, Patent application PCT/EP2014/068374.
7. L. Raczyński, et al.: *Novel method for hit-position reconstruction using voltage signals in plastic scintillators and its application to Positron Emission Tomography*, Nucl. Instrum. Meth., A764, 2014, 186-192. doi:10.1016/j.nima.2014.07.032.
8. L. Raczyński, et al.: *Compressive sensing of signals generated in plastic scintillators in a novel J-PET instrument*, Nucl. Instrum. Meth., A786, 2015, 105-112.
9. A. Gajos, E. Czerwiński, D. Kamińska, P. Moskal: *Multi-tracer morpho-metric image reconstruction method and system using fast analytical algorithm for calculating time and position of positron-electron annihilation into three gamma quanta*, Patent application PCT/PL2015/050038.
10. A. Gajos: *A novel algorithm for the $K \rightarrow \pi^0 \pi^0 \rightarrow 4\gamma$ decay vertex reconstruction for the KLOE-2 experiment*, Master's thesis, Jagiellonian University, Poland 2013.
11. A. Gajos: *Study of the $K_S K_L \rightarrow n\ell u 3\pi^0$ Process for Time Reversal Symmetry Test at KLOE-2*, Acta Phys. Polon., B46(1), 2015, 1318, doi:10.5506/APhysPolB.46.13.
12. P. Kubica, A.T. Stewart: *Thermalization of Positrons and Positronium*, Phys. Rev. Lett., 34, 1975, 852.
13. K. Szkliniarz et al.: *Medical Radioisotopes Produced Using the Alpha Particle Beam from the Warsaw Heavy Ion Cyclotron*, Acta Phys. Polon., A127(5), 2015, 1471.

reklama



medinwestycje.pl

Zobacz,
jak rozwijają się
usługi medyczne
w Polsce

Historie
dobrze
zarządzanych
szpitali, zakupów
najnowocześniejszego
sprzętu i modernizowania oddziałów

Zapraszamy do kontaktu. Opowiedz o inwestycji medycznej i nowoczesnym sprzęcie medycznym.

www.medinwestycje.pl | redakcja@medinwestycje.pl