

Grażyna Kontrym-Sznajd

Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN, Wrocław

## Wpływ odkryć w fizyce na rozwój diagnostyki medycznej

Epokowym odkryciem, które zmieniło oblicze medycyny, początkując erę bezinwazyjnego obrazowania wnętrza ciała ludzkiego, było odkrycie przez Wilhelma Röntgena tajemniczego promieniowania X. Odkrycie to zostało dokonane zupełnie przypadkowo 8.11.1895 roku, w czasie badań promieni katodowych w zaciemnionym laboratorium i w obecności związków fluoryzujących. Fascynujące jest to, że w owych czasach nawet nie wiadomo czym są promienie katodowe - nie znano elektronu, a za najmniejszą, niepodzielną cząstkę materii uważano (aż do 1911 r.) atom (z greki *átomos* – niepodzielny). W tym czasie promieniowanie katodowe, zatrzymywane przez obudowę lampy, traktowano jako materię w stanie promienistym, natomiast na temat tajemniczych promieni X (kiedy już uwierzono w ich istnienie) wysnuwano przeróżne hipotezy – Rentgen podejrzewał, że są to fale eteru wypełniającego cały Wszechświat. Jak się potem okazało, promieniowanie katodowe to strumień elektronów emitowanych przez katodę, natomiast promienie X to fale elektromagnetyczne generowane podczas wyhamowywania elektronów przez anodę (dokładne wyjaśnienie tego zjawiska podała dopiero mechanika kwantowa).



**Wilhelm Conrad Röntgen** (27.03.1845 – 10.03.1923) fizyk niemiecki, laureat pierwszej Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki (1901 r.) za odkrycie promieniowania X, nazwanego promieniowaniem rentgenowskim.

Otrzymał Nagrodę Nobla Röntgen w całości ofiarował Uniwersytetowi w Würzburgu, czego nie zrobił żaden późniejszy laureat. Nie opatentował swojego wynalazku uważając, że:

**nauka to nie biznes, nauka powinna służyć ludzkości.**

**Ramka 1** - Wilhelm Röntgen, niezwykle człowiek i naukowiec [1- 3].

Röntgen, po 7 tygodniach intensywnych badań, kiedy miał już pewność, że lampa Crookesa jest źródłem nie tylko promieniowania katodowego, ale również niewidzialnych i niezwykle przenikliwych promieni X, wykonał radiogram ręki żony i 28 grudnia 1895 r. złożył pracę do druku, wysyłając również artykuł ze zdjęciami do kilku kolegów w kraju i zagranicą. Część z nich uznała to za żart, inni doznali szoku. Traf chciał, że profesor Exner z Wiednia pokazał

zdjęcia grupie młodych fizyków, wśród nich dr E. Lecherowi, którego ojciec był wydawcą prasowym *Vienna Presse*. Dzięki temu już 5 stycznia 1896 r. ukazała się w prasie wiedeńskiej informacja o odkryciu promieni X, którą wkrótce przedrukowały czasopisma na całym świecie: *Zamieszanie spowodowane wojną nie powinno odwrócić uwagi od wspaniałego triumfu nauki. Wiedeń donosi, że prof. Röntgen z Uniwersytetu w Würzburgu odkrył światło, które pozwala wykonywać fotografie przez drewno, ciało ludzkie, ubranie i większość innych substancji organicznych. Profesor zdołał sfotografować kawałki metalu zamknięte w drewnianej skrzynce i otrzymał zdjęcie ręki ludzkiej, na którym widoczne są tylko kości, bez tkanki mięśniowej*” (Londyn, Daily Chronicle, 6.01.1896 r.).

Niezwykle interesująca jest historia polskiej radiologii, a tempo jej rozwoju wręcz imponujące [4, 5]. Prawie natychmiast po ukazaniu się informacji na temat odkrycia Röntgena, profesor chemii Uniwersytetu Jagiellońskiego (UJ), Karol Olszewski, wykonał rentgenogramy różnych przedmiotów, o czym 21.01.1986 r. poinformowała krakowska gazeta CZAS. Wkrótce potem przeprowadzono pierwsze badanie radiologiczne (ramka 2).



Przedruk z ówczesnej gazety:

*zdjęcie trwało siedem kwadransów; ręka nieszczęśliwego obiektu była za pomocą opasek z blachy przyśrubowana do stołu i w ten sposób unieruchomiona.*

**Ramka 2** – pierwsze badanie radiologiczne w Polsce. Prof. chirurgii UJ, A. Obaliński, wykorzystał promienie X do zbadania łokcia górnik. Badanie wykonał prof. K. Olszewski z asystentami.

Mnie jednak, jako fizyka zajmującego się metodami tomografii komputerowej, najbardziej zachwyliły prace polskiego lekarza, dr Karola Mayer’a, który w lipcu 1914 r., na zjeździe we Lwowie, wygłosił referat, przedstawiając metodę otrzymywania obrazów w oparciu o zasady tomografii. Praca ta, mimo iż została opublikowana (ramka 3), uszła uwadze światowej i wśród pomysłodawców tomografii komputerowej ten genialny lekarz, który jest również autorem patentu lampy rtg, zaopatrzonej w dwie lub więcej anod i katod (Patentschrift nr 274790) i wielu innych wynalazków [6], nie jest wymieniany.

Pomysł Mayera wyprzedził o 7 lat przedstawienie idei trójwymiarowego obrazowania przez A. Bocage oraz uzyskanie przez niego patentu w 1921 r. Tę datę przyjęto jako powstanie tomografii rentgenowskiej, jakkolwiek jej prawdziwy rozwój zapoczątkowały dopiero prace Cormacka [7] (teoria) oraz brytyjskiego inżyniera G. Hounsfield’a (konstrukcja pierwszego

tomografu z zastosowaniem promieni X – rys. 1), za które obaj badacze otrzymali w roku 1979 Nagrodę Nobla

**RADYOLOGICZNE**  
ROZPOZNAWANIE RÓŻNICZKOWE  
CHOROÓB SERCA I AORTY

Z UWZGLĘDNIENIEM WŁASNYCH METOD BADANIA

PODZIAŁ

DR KAROL MAYER

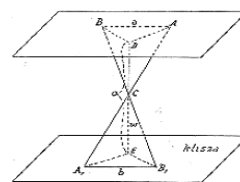
ASYSTENT KLASYKI RADYOLOGICZNEJ UNIW. JAGIELL.  
KATEDRY PŁATYKICH RADYOLOGICZNYCH C.I.K.  
OFICJALNA KATEDRA W WARSZAWIE

Z 38 RYCINAMI

KRAKÓW 1916  
KSIĘGARNIA G. CEBETHENHA I SPÓŁKI –  
WARSZAWA – G. CEBETHENHA I WOLFF.

Jak z rysunku widać, powstały dwie piramidy podobne, mianowicie  $ADD_1C_1$  i  $A_1B_1BC_1$ .  
W piramidach podobnych odpowiednio boki, podstawy, krawędzie i wysokości są do siebie proporcjonalne.

Zatem  $AB : A_1B_1 = CD : C_1D_1$ .  
Podstawmy za  $AC = a$ ,  
 $A_1C_1 = b$ ,  
 $DE = o$ ,  
 $CE = w$ ,  
 $CD = c - w$ .



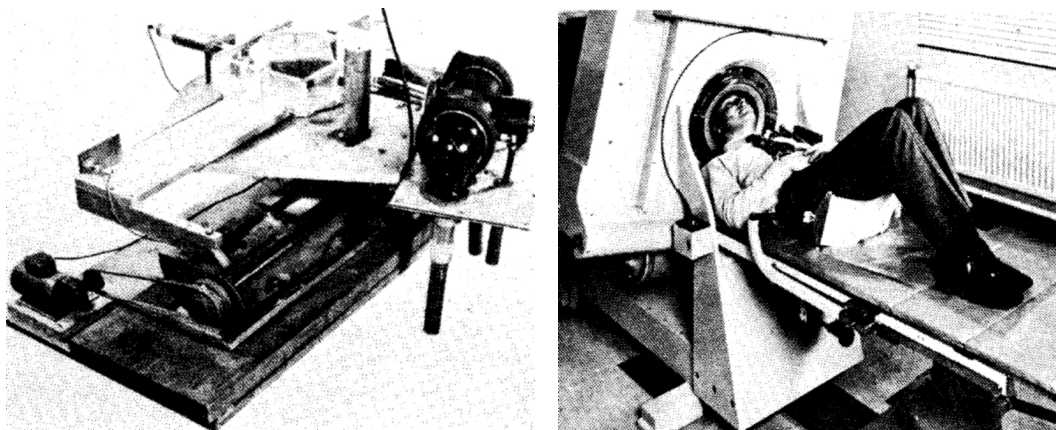
rys. 1.

Z powyższej proporcji  $a : b = o : w$  można się dowiedzieć, od czego zależy  $A_1B_1 = b =$  wielkość przesunięcia się cienia przy naczyniach ruchomych. Mianowicie:

$$b = \frac{a \cdot w}{o}$$

w czasie całej ekspozycji wykonują szybkie a małe ruchy lampą tam i na powrót, równoległe do osi podłużnej lub poprzecznej... Przez ten prosty sposób osiągam albo zupełne zniknięcie cieni, nie należących do cienia sercowego i naczyń głównych, albo częściowe oddzielenie się ich tak, że zorientowanie się co do kształtu poszczególnych łuków staje się możliwym. (publ. 1916 r.)

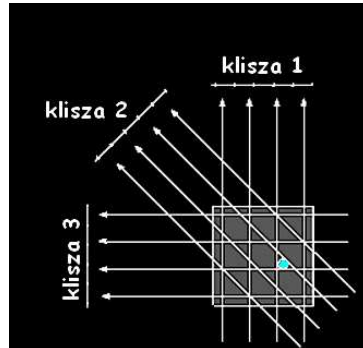
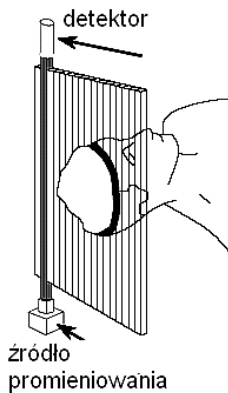
Ramka 3 – Publikacja dr K. Mayera, stosującego pomysł takich badań w praktyce.



Rys. 1. Z wykładu noblowskiego G.N. Hounsfield'a [8]. Aparatura, na której przeprowadzał pierwsze badania (wyniki były zapisywane na taśmie papierowej) oraz pierwsza aparatura zainstalowana w szpitalu w Londynie w roku 1972

**Tomografia** (z greckiego: *tomé* + *gráfein*) oznacza przekrój + zapisywać. Idea Cormacka była następująca. Obiekt „kroimy” na wzajemnie równoległe płaszczyzny, „zbierając dane”, a następnie przeprowadzając rekonstrukcję obrazu, na każdej z tych płaszczyzn niezależnie (rys. 2). Z jednej strony obiektu umieszczone jest źródło promieni X o natężeniu  $I_0$ , z drugiej strony odbiornik, rejestrujący natężenie tego promieniowania po przejściu przez obiekt wzdłuż danej linii  $L$ . Zmiana natężenia tego promieniowania zależy od gęstości w każdym z punktów  $r$  znajdujących się na wybranej linii  $L$ . Wykonując pojedyncze zdjęcia rentgenowskie (rtg) otrzymujemy obraz (rys. 2), na którym każdy punkt na kliszy odpowiada jednemu równaniu o wielu niewiadomych. Jeżeli jednak prześwietlimy obiekt pod wieloma

kątami (nawet zmieniając kąt co  $1^{\circ}$  w zakresie od  $0$  do  $180^{\circ}$ ), otrzymamy dodatkowe równania, co pozwala odtworzyć gęstość w dowolnym punkcie  $r$ . Na tej zasadzie pracowały tomografy pierwszej generacji.



**Rys. 2.** Tomografia to wykonanie serii „zdjęć” - prześwietlenie obiektu pod wieloma kątami. Dzielenia obiektu na płaszczyzny wzajemnie równoległe pozwala sprowadzić rekonstrukcję trójwymiarowego obrazu do zespołu dwuwymiarowych rekonstrukcji.

Matematycznych metod tomografii komputerowej jest bardzo wiele – od rozwiązywania równań algebraicznych, poprzez transformaty Fouriera do różnorodnych rozwiązań tzw. transformaty Radona [9]. Metody te są ciągle udoskonalane, tak jak i aparatura badawcza (rys. 3), dzięki czemu otrzymywany obraz jest coraz lepszej jakości, a przy okazji napromieniowanie pacjenta mniejsze.

Ponieważ tomografia rtg<sup>1</sup> pozwala jedynie zróżnicować tkanki o odpowiednio różnej gęstości, co nie zawsze daje możliwość odróżnienia zmian patologicznych od fizjologicznych, następuje szybki rozwój innych metod diagnostycznych, takich jak emisyjna tomografia pozytonowa (PET, 1975 r.) i magnetyczny rezonans jądrowy (NMR, 1977 r.) – rys. 3.



Rys. 3. Aparatura NMR i obrazy otrzymywane kiedyś i dziś. Pierwszy udany skan NMR zarejestrowano już w lipcu 1977 r. [[https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic\\_resonance\\_imaging](https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_resonance_imaging)]

<sup>1</sup> z niezrozumiałych powodów potocznie nazywana CT (computer tomography), ponieważ NMR i PET to również tomografie komputerowe. Spotykane nazwy, np. PET-CT oznaczają, że połączono dwie metody diagnostyczne – w tym przypadku PET i tomografię rtg.

Magnetyczny rezonans jądrowy to zjawisko absorpcji a następnie, w wyniku powrotu układu do stanu równowagi, rejestracji re-emisji fal elektromagnetycznych (o częstotliwości radiowej) przez jądra atomowe (o niezerowym spinie) znajdujące się w stałym polu magnetycznym. Niezerowy spin mają jądra o nieparzystej liczbie nukleonów, takie jak  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{19}\text{F}$ ,  $^{23}\text{Na}$ ,  $^{31}\text{P}$ . Częstość rezonansowa zależy od pola magnetycznego jak i konkretnego jądra – w ten sposób można „wybierać” rezonans na określonych jądrach, którymi najczęściej są protony, czyli jądra wodoru. Stosowanie dodatkowo środków kontrastowych, mających różne właściwości magnetyczne, pozwala badać funkcje narządów, jak np. wydzielanie nerkowe, ogniska zapaleń, ukrwienie. Żeby odtworzyć obraz jak w tomografii, częstość rezonansowa musi być funkcją położenia – dlatego stałe pole magnetyczne posiada gradient (w funkcji położenia) w jednym, dwóch, a nawet trzech kierunkach. Największe znaczenie ma NMR w badaniach kręgosłupa oraz angiografii, tzn. uzyskiwaniu obrazu naczyń krwionośnych. W badaniach naukowych stosuje się też czynnościowy NMR, badając najczęściej aktywność neuronów podczas odbierania różnych bodźców.

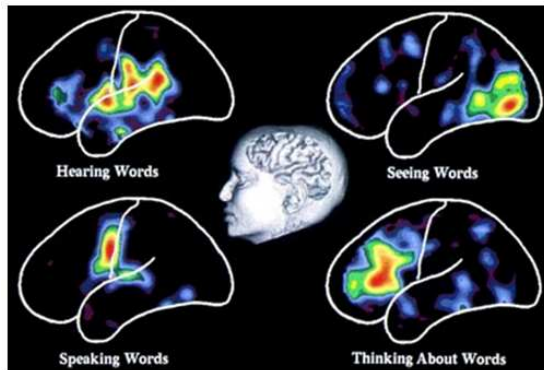
Tomografia pozytonowa oparta jest na zjawisku anihilacji elektronu i pozytonu (antycząstki elektronu), prowadzącym do zamiany ich masy na energię, emitowaną w postaci kwantów gamma. Jeżeli w procesie anihilacji nie bierze udziału żaden dodatkowy układ fizyczny, z zasady zachowania pędu i energii wynika, że muszą powstać co najmniej dwa fotony rozchodzące się prawie antyrównolegle. W związku z tym, jeżeli liczniki rejestrujące liczbę powstających kwantów  $\gamma$  usytuujemy antyrównolegle, tuż przy badanym obiekcie, zarejestrują one wszystkie akty anihilacji, jakie zaszły na danej linii  $L$ .

Emisyjna<sup>2</sup> tomografia pozytonowa powstała na bazie autoradiografii tkanek, czyli rejestracji rozmieszczenia preparatu promieniotwórczego w określonych narządach. W badaniu tym stosuje się izotopy pierwiastków biogennych (naturalnych pierwiastków występujących w organizmie ludzkim), których czasy połowicznego rozpadu są na tyle krótkie [ $^{15}\text{O}$  (2,07 min),  $^{13}\text{N}$  (9,97 min),  $^{11}\text{C}$  (20,3 min),  $^{18}\text{F}$  (109,7 min.)], żeby napromieniowanie pacjenta było jak najmniejsze. PET służy do badania przepływu krwi przez określone narządy, ekspresji wybranych receptorów lub metabolizmu niektórych substancji (tlenu, glukozy, leków, itd.), znakowanych preparatem promieniotwórczym. Umożliwia to badanie czynnościowe narządów, zarówno w obserwacjach stanów fizjologii, jak i patologii. Badania fizjologii,

---

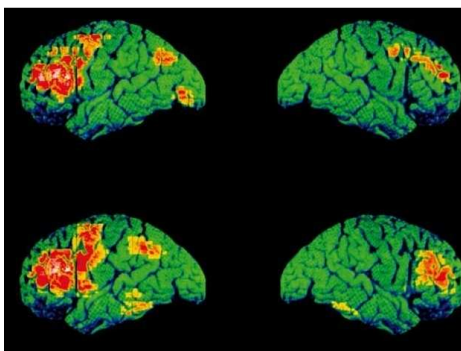
<sup>2</sup> Tomografia emisyjna, w odróżnieniu od transmisyjnej, jaką jest NMR oraz CT, oznacza, że źródło promieniowania znajduje się wewnątrz badanego obiektu.

gdzie wykorzystuje się ściśle powiązania pomiędzy aktywnością neuronalną, zużyciem energii i miejscowym przepływem krwi, dotyczą w szczególności badania procesów zachodzących w mózgu, m.in. procesów postrzegania, słuchania, myślenia i percepcji obrazów [10 – 12], zilustrowanych na rys. 4.



Rys. 4. Aktywność mózgu kolejno dla słyszenia, wypowiedzania oraz tworzenia wyrazów

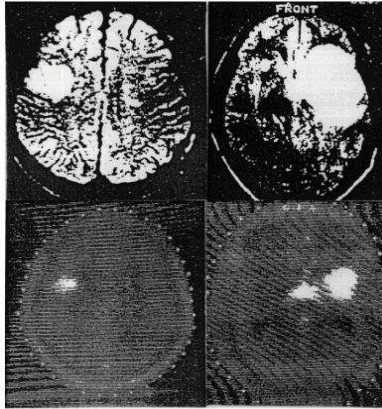
Do badania stanów patologicznych metodę PET wykorzystuje się w neurologii, neurochirurgii, psychiatrii, kardiologii i onkologii (80% wszystkich badań). W dziedzinie neurologii można zróżnicować przyczyny otępienia, będącego objawem wielu chorób, np. choroby Alzheimerera. Badanie PET ma duże znaczenie w określeniu ognisk epileptycznych, co decyduje o kwalifikacji pacjentów do zabiegu operacyjnego, jak również umożliwia precyzyjne wykonanie operacji neurochirurgicznych. Kolejna grupa schorzeń to choroby neurologiczne związane z zaburzeniami ruchu, jak np. choroba Parkinsona. W celu oszacowania wydolności mięśnia sercowego bada się metabolizm kwasów tłuszczowych, a dla lokalizacji zawału - miejscowy przepływ krwi.



Rys. 5 Badanie aktywności mózgu osoby mówiącej: osoby zdrowej i cierpiącej na schizofrenię (prawa i lewa część rysunku)  
[<http://zdrowie.gazeta.pl/Zdrowie/51,111848,9649809.html>]

Metoda PET ma jednak największe znaczenie w onkologii, gdzie wykorzystuje się zależność metabolizmu glukozy od stopnia ułośliwienia nowotworu, pozwalającą odróżnić zmianę łagodną od złośliwej, stwierdzić przerzuty czy odróżnić nawrót guza od zmiany powstałej wskutek operacji, chemo- lub radioterapii. Badanie PET ma istotne znaczenie w momencie trudności diagnostycznych - w takim przypadku wykonanie badania całego ciała umożliwia

umieszczenie procesu nowotworowego. Na rys. 6 przedstawiono wyniki badania pacjenta z nowotworem mózgu: NMR stwierdza istnienie cysty, natomiast PET pokazuje te obszary, w których zwiększony metabolizm glukozy świadczy o złośliwości guza.



Rys. 6. Astrocytoma, st. złośliwości II. Górna część rysunku przedstawia wyniki NMR, dolna wyniki PET [13].

Może ucieszy nas fakt, że najnowocześniejszy skaner PET-CT GE Discovery IQ, który skraca czas badania z 20 do 4 minut i zapewnia precyzyjny obraz drobnych zmian nowotworowych, uruchomiono we Wrocławiu. Aparatura ta (rys. 7) pozwala wykonać do tysiąca badań miesięcznie (koszt jednego wynosi 3 300 zł), lokalizując zmiany nowotworowe wielkości 2-3 mm (aparatura poprzedniej generacji wykrywała ogniska chorobowe 5-6 mm). W czerwcu 2015 r. taką aparaturę uruchomiono również w Poznaniu.



**Rys. 7.** Skaner PET-CT GE Discovery IQ, którego „światowa premiera” odbyła się 12.2014 r. w USA [<http://wroclaw.onet.pl/wroclaw-uruchomiono-najnowoczesniejszy-w-polsce-aparat-pet-ct/5tck35>].

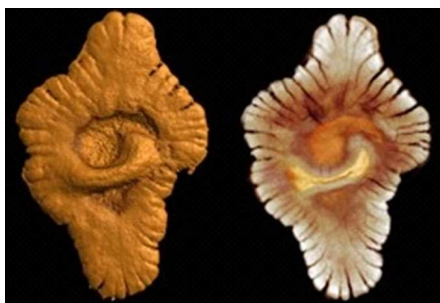
Znane i popularne badanie scyntygraficzne (rejestracja fotonu emitowanego przez źródło promieniotwórcze umieszczone w ciele pacjenta) może być również przeprowadzone w technice trójwymiarowego obrazowania. Jest to tomografia pojedynczego fotonu, SPECT (skrót od **s**ingle-**p**hoton **e**mission **c**omputed **t**omography), mająca szerokie spektrum zastosowań klinicznych. W przeciwieństwie do skanera PET, który jest zazwyczaj używany do obrazowania całego ciała z wykorzystaniem  $^{18}\text{F}$ -fluorodeoksyglukozy, w badaniu SPECT, używając różnych radiofarmaceutyków, bada się zazwyczaj konkretny organ, np. tarczycę po podaniu jodu  $^{131}$ . Technika ta, rozwijana od lat 70., będąca znacznie tańszą od obrazowania PET, również w ostatnich latach przeżywa „rewolucję technologiczną”.

Postęp technologiczny powoduje powstawanie (i to w coraz krótszych odstępach czasu, ostatnio nawet 2-3 lat) sprzętu kolejnej generacji - dotyczy to zarówno ulepszania istniejących aparatów badawczych jak i powstawania nowych metod diagnostycznych. Najnowszy rodzaj badań z zastosowaniem metod tomografii komputerowej to optyczna koherentna tomografia, OCT (Optical Coherence Tomography) – pierwszy tomogram żywego oka wykonano w 2001 roku. Wykorzystując interferencję wiązek światła o długości zbliżonej do podczerwieni, rozproszonej na warstwach oka, przeprowadza się badanie (z rozdzielczością 0.01 - 0.02 mm) siatkówki w obrębie plamki żółtej, nerwu wzrokowego oraz rogówki, tęczówki i soczewki.

W ostatnich latach powstała również 3-wymiarowa (a nawet 4-wymiarowa, gdzie czwartym wymiarem jest czas) technologia USG. Jest ona niezwykle przydatna w położnictwie, ponieważ obserwacja narządów wewnętrznych płodu zwiększa wykrywalność jego wad.

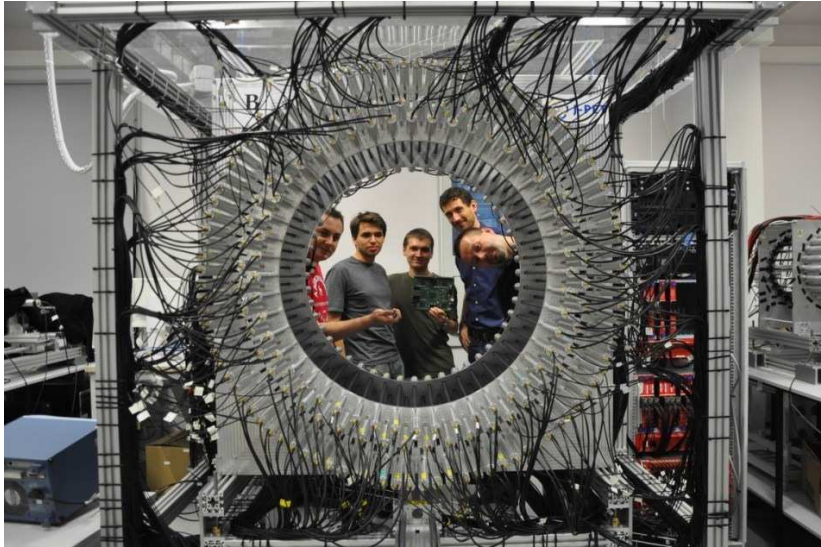
Tomografia ma wielorakie zastosowanie, również w badaniach materiałowych. Stosowane są tu dwa rodzaje mikrotomografów rtg: micro-CT (dokładność do  $1 \mu\text{m} = 10^{-3} \text{ mm}$ ) oraz nano-CT ( $1 \text{ nm} = 10^{-6} \text{ mm}$ ), które pozwalają badać szczegóły o rozmiarach 200 nm (sto razy mniejszych niż włos). Micro-CT stosowane są m.in. w geologii, architekturze, rzeźbie i budownictwie (do badania zjawiska wietrzenia, konserwacji kamienia budowlanego); jubilerstwie (analizy czystości kamieni szlachetnych), itd. Nano-CT pozwoli m.in. poznać strukturę kości, np. w celu zaprojektowaniu idealnej i trwałej endoprotezy.

Dzięki tomografii rtg, w Gabonie odnaleziono jednocentymetrowe struktury, skomplikowane wielokomórkowe formy życia sprzed 2 miliardów lat (rys. 8), które poprzedzają aż o 1,5 mld lat "eksplozję kambryjską" [14]. Legendarny „Betts”, stradivarius z 1704 r., został zrekonstruowany - pracami kierował radiolog z amerykańskiej kliniki. Jak się okazało, instrument ma swoją wewnętrzną anatomię [15].



**Rys. 8.** Znaleziska w Gabonie [14].

Na zakończenie powrót do Krakowa, na UJ, gdzie grupa fizyków, pod kierownictwem prof. Pawła Moskala, prowadzi badania nad udoskonaleniem aparatury PET, nazwanej J-PET (Jagiellonian Positron Emission Tomograph) [16].



Rys. 9. Grupa fizyków z UJ przy zestawie nowych liczników do aparatury J-PET.

Badania prowadzone w tym zakresie doczekały się już 12 patentów jak również wyróżnienia złotym medalem na Światowych Targach Wynalazczości, Badań Naukowych i Nowych Technologii: BRUSSELS INNOVA 2009. Prowadzone prace mają na celu uruchomienie nowej aparatury, wykorzystującej organiczne materiały scyntylacyjne (rys. 9). Pozwoli to istotnie obniżyć koszt aparatury PET jak również zwiększyć efektywność i szybkość odtwarzania obrazu (również dzięki obrazowaniu całego ciała) [17]. Ponadto, tego typu aparatura zostanie wykorzystana do badań „struktury” różnorodnych materiałów porowatych, mających unikalne zastosowania, m.in. jako „magazyny” różnych substancji, w tym leków. Z kolei biomateriały o odpowiedniej strukturze mogą służyć do otrzymania analogów tkanek naturalnych a nawet do stworzenia medycznych mikrorobotów [18].

## Bibliografia

1. Meyer Friedman, Gerald W. Friedland, *Dziesięć największych odkryć w medycynie*, Prószyński i S-ka; <http://portalwiedzy.onet.pl/12693,105,4,1,1,biblioteka.html>
2. <http://wu.po.opole.pl/wilhelm-konrad-roentgen-wielki-czlowiek-i-naukowiec>, Krzysztof Besztak, Grzegorz Jeziński
3. Jerzy Przystawa, *Odkryj smak fizyki*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2011
4. <http://www.radiologia-malopolska.org/historia/>
5. <http://www.polradiologia.org/index1.html> Opracowali Stanisław Leszczyński i Andrzej Urbanik na podstawie *Historia radiologii polskiej na tle radiologii światowej* pod redakcją St. Leszczyńskiego (Wydawnictwo Medycyna Praktyczna, Kraków 2000)
6. Poza wieloma pracami naukowymi, prof. K. Mayer jest twórcą wielu patentów, m.in. oftalmomikroskopu, dwuanodowej lampy rentgenowskiej, rentgenooptycznego separatoru projekcyjnego, amortyzujących butów ortopedycznych, łóżka do rentgeno- i radioterapii

obrotowej). Był też pionierem teorii hydrodynamicznej ruchu krwi i limfy w ustroju. Publikował w językach polskim, czeskim, francuskim, angielskim, włoskim i niemieckim,

7. A.M. Cormack, *J. Appl. Phys.* **34**, 2722 (1963); **35**, 2908 (1964).

8. Godfrey N. Hounsfield, *Computed medical imaging*, Nobel lecture, 8.12.1979.

9. A. Brooks, G. Di Chiro, *Principles of Computer Assisted Tomography(CAT) in Radiographic and Radioisotopic Imaging*, *Phys. Med. Biol.* **21**, 689-732 (1976).

10. *Positron Emission Tomography*, red. M. Reivich i in. (NY 1985).

11. M.A. Mandelkern, *Nuclear techniques for medical imaging: Positron emission tomography*, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **45**, 205 (1995).

12. G.D. Fischbach, *Psychika a мозг*, *Świat Nauki*, nr 11(15), 20-31 (1992); M.E. Raichle, *Obrazowanie procesów myślowych*, *Świat Nauki*, nr 6 (34), 26-33 (1992).

13. K. Ericson, A. Lilja, in *Clinical efficiency of positron emission tomography*, ed. W.D.Heiss, G. Pawlik, K.Herholz, K.Wienhard, 1987 Martinus Nijhoff Publishers, str. 381.

14. <http://www.chip.pl/news/wydarzenia/nauka-i-technika/2010/07/nvidia-odkryla-najstarsze-organizmy-wielokomorkowe>

15. <http://www.bbc.com/news/technology-15926864>

16. <http://koza.if.uj.edu.pl/pet/>

17 P. Moskal P.S. Alabura, M. Silarski, J. Smyrski, J. Zdebik, M. Zieliński, *Novel Detector Systems for the Positron Emission Tomograph*, *Bio-Algorithms and Med-Systems* **7**, 73-78 (2011); P. Moskal, Sz. Niedzwiecki, T. Bednarski, *et al.*, *Test of a single module of the J-PET scanner based on plastic scintillators*, *Nucl. Inst. and Meth. A* **764**, 317-321 (2014); P. Moskal, N. Zon, T. Bednarski, *et. al.*, *A novel method for the line-of-response and time-of-flight reconstruction in TOF-PET detectors based on a library of synchronized model signals*, *Nucl. Inst. and Meth. A* **775**, 54-62 (2015).

18. <http://materialyinzynierskie.pl/porowate-mikroroboty-w-medycynie>