

# O PROMIENIOWANIU RENTGENOWSKIM RAZ JESZCZE

GRZEGORZ JEZIEFSKI

ARTYKUŁY

## 1. WSTĘP

Wdrażane u nas w kraju normy europejskie PN-EN, np. z zakresu badań nieniszczących metodami radiologicznymi, często są krytykowane przez specjalistów zarówno pod względem merytorycznym, ale także i tematyczno-organizacyjnym. Jednakże ze względu na wymóg wiernego ich tłumaczenia na język polski, a także z powodu braku aktywnego udziału naszych specjalistów przy tworzeniu nowych norm (po wejściu Polski do Unii Europejskiej) normy te zostają formalnie wprowadzane w naszym kraju, nie zawsze spełniając właściwą sobie funkcję. Autor niniejszego referatu chciałby wyraźnie podkreślić, iż stosowane w przeszłości polskie normy PN były pod tym względem wielokrotnie bardziej wartościowe niż obecne normy PN-EN.

Na bazie jednego tylko terminu – **promieniowanie X** – ujętego w normie terminologicznej „PN-EN 1330-03 Badania nieniszczące. Terminologia. Terminy stosowane w radiograficznych badaniach przemysłowych”<sup>1</sup> autor chciałby przedstawić problemy związane z definicjami niektórych pojęć w zakresie terminologii.

## 2. PROMIENIOWANIE RENTGENOWSKIE – DEFINICJE

Podstawowym pojęciem w badaniach radiograficznych, czy ogólniej rzecz biorąc – radiologicznych (na które składają się badania radiograficz-

ne, radioskopowe oraz radiometryczne) jest m.in. promieniowanie rentgenowskie. Otóż każdy, kto ma do czynienia z tym rodzajem promieniowania, winien rozumieć czym jest promieniowanie rentgenowskie i w jakich okolicznościach ono powstaje. Niestety, wykorzystując w tym celu odpowiednią normę PN-EN [1] mamy niewłaściwą definicję tego pojęcia i tym samym wiele późniejszych problemów ze zrozumieniem powstawania promieniowania rentgenowskiego.

Na wstępie, tylko dla przypomnienia, na rys. 1 przedstawiono **umowny** (stworzony przez człowieka, a nie przez naturę) podział promieniowania elektromagnetycznego, z którego wynika iż np. promieniowanie rentgenowskie zachodzi od strony niskich energii na promieniowanie nadfioletowe, a od strony wysokich energii na promieniowanie *gamma*.

Poniżej przytoczono za normą PN-EN [1] definicję tego promieniowania, jak również zacytowano definicje pochodzące z innych dostępnych krajowych źródeł:

Norma PN-EN 1330-03 Badania nieniszczące. Terminologia. Terminy stosowane w radiograficznych badaniach przemysłowych

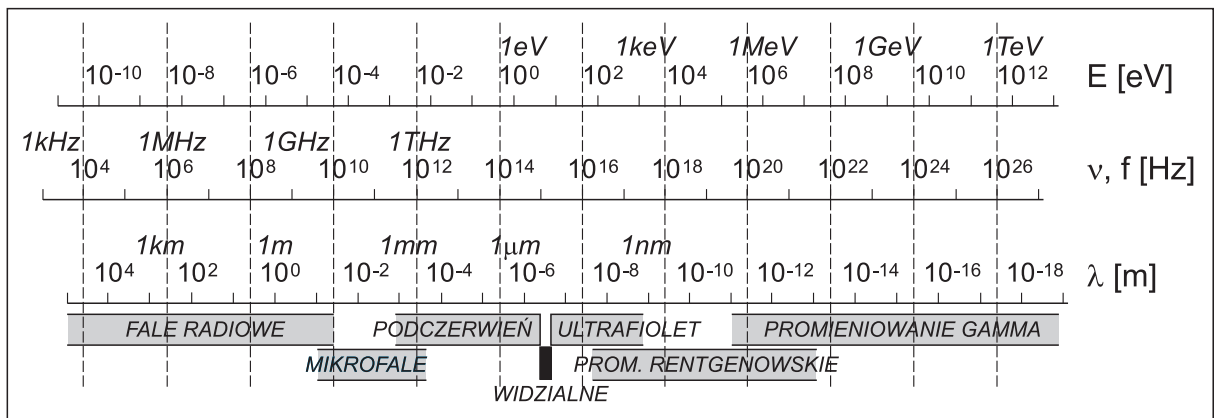
**Promieniowanie X** – *przenikliwe promieniowanie elektromagnetyczne, w zakresie długości fal od 1 do 0,0001 nanometrów<sup>2</sup>, które powstaje w wyniku zderzenia elektronów o dużej prędkości z tarczą metalową.*

Nowa Encyklopedia Powszechna – PWN 1966 r.

**Promieniowanie rentgenowskie** – *promieniowanie elektromagnetyczne o fali długości od*

<sup>1</sup> Norma ta w języku polskim zatraciła w ogóle swój właściwy układ (porządek), jako że w języku oryginalnym porządek został ustanowiony alfabetycznie tj. w celu szybkiego znajdowania odpowiednich pojęć (a jest ich w normie 131); w tłumaczeniu na język polski brak jest tego porządku.

<sup>2</sup> Odpowiada to energii fotonów 1,24 keV do 12,4 MeV



Rys. 1. Umowny podział promieniowania elektromagnetycznego

ok. 0,0001 nm do ok. 100 nm<sup>3</sup> powstaje w wyniku hamowania cząstek naładowanych przez materię (tzw. promieniowanie hamowania) lub w rezultacie przejścia elektronów w atomach (zjonizowanych w powłoce wewnętrznej) z poziomów o wyższej energii na poziomy o niższej energii (tzw. promieniowanie charakterystyczne); źródłem promieniowania rentgenowskiego są różnego rodzaju lampy rentgenowskie, pierwiastki promieniotwórcze, akceleratory cząstek, a także wiele ciał niebieskich.

Encyklopedia Techniki – Energia Jądrowa – WNT 1970 r.

**Promieniowanie rentgenowskie** – promieniowanie elektromagnetyczne odkryte przez W.K. Röntgena podczas bombardowania metali elektronami.

Encyklopedia Techniki – Podstawy Techniki – WNT 1974 r.

**Promieniowanie rentgenowskie** jest to promieniowanie elektromagnetyczne powstające podczas bombardowania metalu elektronami.

Fizyka współczesna – Paul W. Hewitt – PWN 2001 r.

**Promienie Röntgena** – promieniowanie elektromagnetyczne o częstotliwości większej od promieniowania nadfioletowego. Emitowane w wyniku przeskoków elektronów na najniższy poziom energetyczny w atomie.

Leksykon Naukowo-Techniczny – PWN 1989 r.

**Promieniowanie rentgenowskie** promieniowanie X, promienie Roentgena – promieniowanie elektromagnetyczne o długości fali (orientacyjnie) od 5 do 2000 pm (0,005 do 2 nm).

PN -75/J-01003/01 Technika jądrowa. Nazwy i określenia. Promieniowanie jonizujące<sup>4</sup>

**Promieniowanie X (promieniowanie rentgenowskie)** – promieniowanie składające się z promieniowania hamowania i (lub) promieniowania charakterystycznego.

**Promieniowanie hamowania** – promieniowanie fotonowe powstające podczas hamowania cząstek naładowanych.

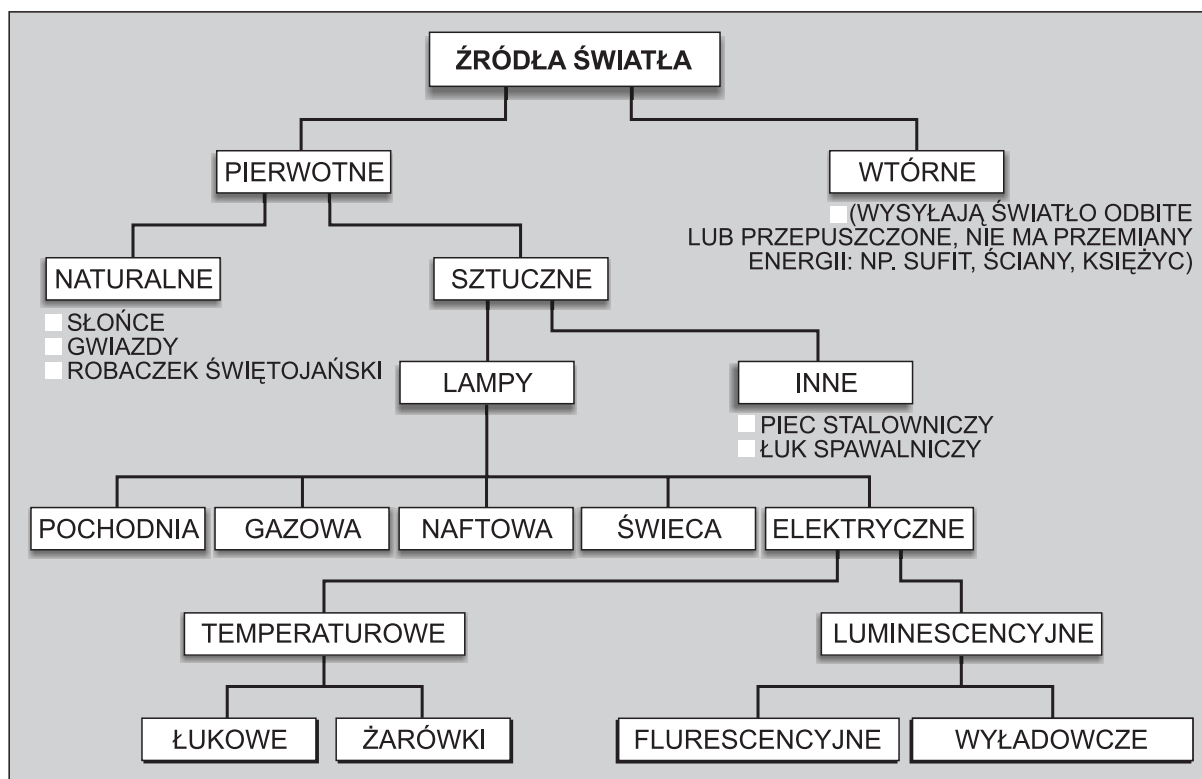
**Promieniowanie charakterystyczne** – promieniowanie fotonowe powstające podczas zmian energetycznego stanu atomu.

Niepoprawność ww. definicji w przedmiotowej PN-EN [1] wynika stąd, iż obejmuje ona zarówno opis promieniowania (i na tym powinien w zasadzie być koniec), jak i fizyczny sposób jego wytwarzania, podany z resztą w sposób wybiórczy, tj. istotny jedynie w odniesieniu do niektórych technik badań nieniszczących. Przypomina to trochę tak, jak byśmy definicję promieniowania widzialnego zapisali następująco: *promieniowanie widzialne jest to promieniowanie elektromagnetyczne o długości fali w zakresie 380 do 780 nm, które powstaje w podgrzanym włóknie wolframowym żarówki*. A wiemy z życia codziennego, jak wiele jest sposobów wytwarzania promieniowania widzialnego – rys. 2. Ponadto ww. definicja promieniowania rentgenowskiego zawiera przymiotnik *przenikliwe*, tym samym wyróżniając znowu jedną tylko z charakterystycznych cech promieniowania rentgenowskiego.

Okazuje się zresztą, iż wiele innych wyżej przytoczonych materiałów źródłowych podaje także nie w pełni dokładną definicję promieniowania rentgenowskiego. Ponadto, można zauważyć istotne różnice w przedstawianiu wartości długości fal, w szczególności od strony fal długich, tj. zachodzących na obszar fal nadfioletowych. Najbardziej poprawna (aczkolwiek nie do końca prawdziwa)

<sup>3</sup> Odpowiada to energii fotonów 12,4 eV do 12,4 MeV

<sup>4</sup> Norma wycofana bez zastąpienia



Rys. 2. Możliwe źródła promieniowania widzialnego

wyduje się być definicja promieniowania rentgenowskiego zamieszczona w *Nowej Encyklopedii Powszechnej*.

### 3. ŹRÓDŁA EMISJI PROMIENIOWANIA RENTGENOWSKIEGO

Istnieje wiele mechanizmów odpowiedzialnych za powstawanie promieniowania rentgenowskiego i przedstawiono je wszystkie poniżej. Promieniowanie rentgenowskie może powstawać:

- ✓ jako skutek zmiany pędu swobodnych elektronów w wyniku:
  - a) hamowania elektronów w polu elektrycznym jądra atomu – powstaje tzw. promieniowanie hamowania;
  - b) przyspieszenia naładowanych cząstek (głównie relatywistycznych elektronów<sup>5</sup>) na torach zakrzywionych<sup>6</sup> – powstaje tzw. promieniowanie synchrotronowe;
  - c) przekazania energii relatywistycznego elektronu fotonowi o niskiej energii – tzw. odwrotny efekt Comptona;

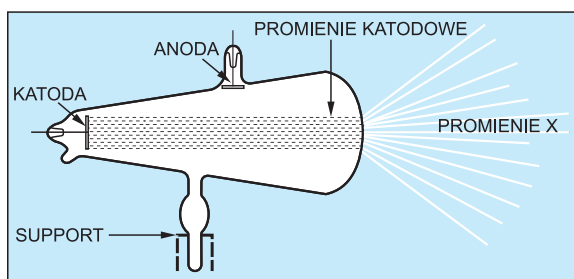
<sup>5</sup> Relatywistyczny – poruszający się z prędkością porównywalną do prędkości światła.

<sup>6</sup> Zgodnie z teorią Maxwella ładunek elektryczny poruszający się z przyspieszeniem jest źródłem promieniowania elektromagnetycznego.

- ✓ podczas wypełniania przez elektron z dowolnej dalszej powłoki luki w bliższej jądra powłoce, powstałej w wyniku:
  - d) wybicia elektronu przez swobodny elektron lub jon dodatni<sup>7</sup> o dostatecznej energii – powstaje tzw. promieniowanie charakterystyczne;
  - e) wybicia elektronu przez foton o dostatecznie dużej energii (promieniowanie wtórne) zwane też promieniowaniem fluorescencji rentgenowskiej;
  - f) rozpadów jąder pierwiastków promieniotwórczych (wychwyt elektronów, zjawisko konwersji wewnętrznej);
- ✓ wymiany ładunku pomiędzy ciężkim jonem, a obojętnym atomem lub cząsteczką;
- ✓ podczas procesu wchłaniania mezonów przez atomy.

Z powyższego przedstawienia ośmiu możliwych mechanizmów powstawania promieniowania rentgenowskiego wynika, iż promieniowanie rentgenowskie może być generowane nie tylko przez wysokoenergetyczne elektrony (jak to ujęto w definicji promieniowania rentgenowskiego wg PN-EN), ale również przez fotony bądź pierwiast-

<sup>7</sup> PIXE – Particle Induced X-ray Emission lub Proton Induced X-ray Emission.



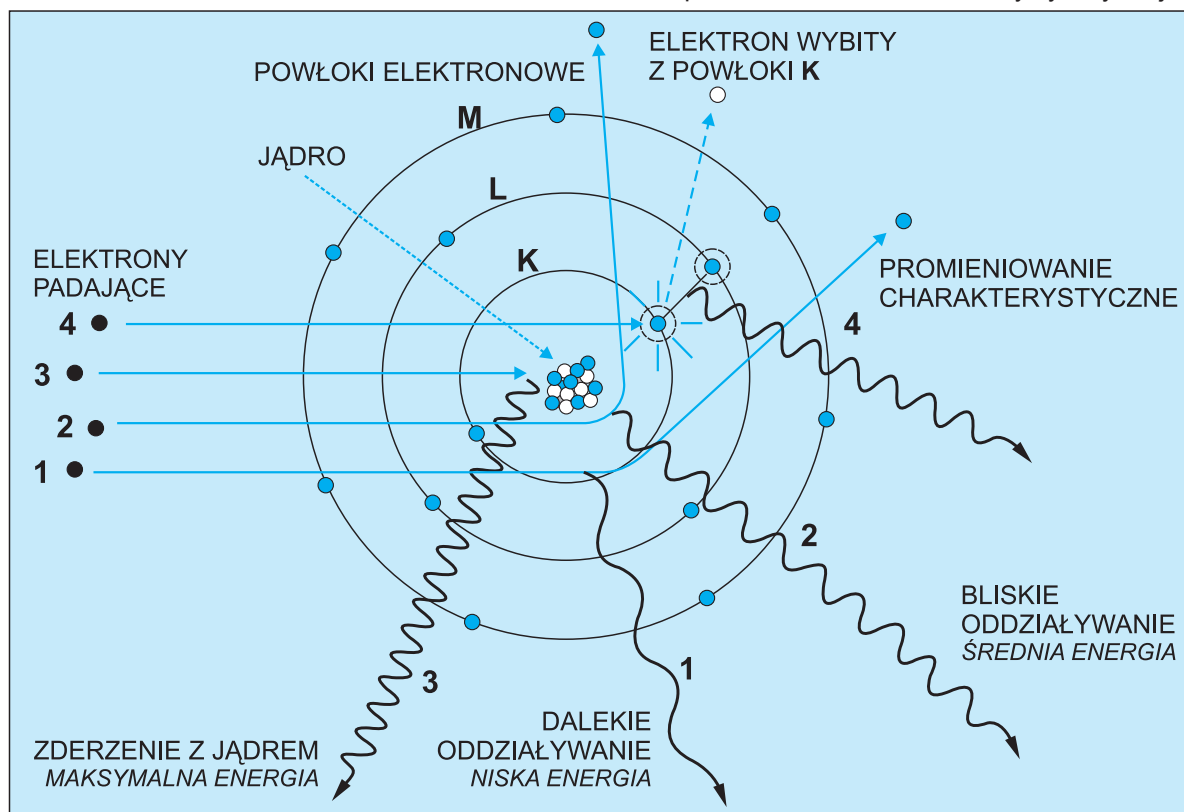
Rys. 3. Rura wyładowcza używana przez Roentgena

ki promieniotwórcze. Poniżej zostaną omówione wszystkie mechanizmy powstawania promieniowania rentgenowskiego, aczkolwiek nie w takiej kolejności jak je wymieniono.

Dla lepszego poznania mechanizmu powstawania promieniowania rentgenowskiego<sup>8</sup> warto przypomnieć moment jego „odkrycia” (a nie „wynalezienia”, bowiem promieniowanie rentgenowskie istnieje w naturze) przez Wilhelma Roentgena w 1895 r. Otóż na rys. 3 przedstawiono lampę wyładowczą stosowaną przez Roentgena podczas jego pierwszych badań. Emisja promieniowania rentgenowskiego pochodziła z miejsca, gdzie promienie katodowe (nie znano wówczas jeszcze elektronu) padały na ściankę szklanej rury, na szczęście dla Roentgena wykonanej z ciężkiego

szkła zawierającego m.in. pierwiastek ołów; nie było tam wówczas żadnej metalowej tarczy.

Dopiero późniejsze badania prowadzone przez samego Roentgena i wielu innych fizyków wykazały, iż można znacznie zwiększyć wydajność promieniowania rentgenowskiego, gdy na drodze przyspieszonych elektronów umieści się metalową tarczę i to tym lepiej, im będzie ona wykonana z pierwiastka o większej liczbie atomowej (większym  $Z$ ). Obecnie dobrze rozumiemy dlaczego tak jest i jakie mechanizmy są odpowiedzialne za emisję wysokoenergetycznego promieniowania elektromagnetycznego, jakim jest promieniowanie rentgenowskie, ale do tego potrzebne było przede wszystkim poznanie złożonej budowy atomu. Na rys. 4 przedstawiono możliwe przypadki oddziaływania przyspieszonych elektronów (a więc takich, które są w stanie zbliżyć się do dodatnio naładowanego jądra wbrew odpychaniu przez zewnętrzne powłoki elektronowe). Analizując poszczególne przypadki możemy wytłumaczyć, iż elektrony 1, 2 i 3 są odpowiedzialne za emisję promieniowania rentgenowskiego o charakterze ciągłym zwanym promieniowaniem hamowania – przypadek (a), natomiast elektron oznaczony jako 4 – za emisję promieniowania o charakterze liniowym, zwanym też promieniowaniem charakterystycznym, jako



Rys. 4. Możliwe mechanizmy oddziaływania wysokoenergetycznych elektronów z atomem

<sup>8</sup> W krajach anglojęzycznych używane jest pojęcie promieniowania rentgenowskiego jako  $\text{-X-ray}$ .

że zależy ono od rodzaju pierwiastka — przypadek (d).

Tabela 1. Wybrane naturalne i sztuczne izotopy promieniotwórcze emitujące m.in. promieniowanie rentgenowskie

Izotop	Główny rodzaj promieniowania	Okres połowicznego rozpadu	Izotop	Główny rodzaj promieniowania	Okres połowicznego rozpadu
Cr-51	X, $\gamma$ , e <sup>-</sup>	27,706±0,007 d	Ta-182	$\beta$ ; X, $\gamma$ , e <sup>-</sup>	114,43±0,03 d
Fe-55	X	2,735±0,022 l	Re-186	$\beta$ ; X, $\gamma$	3,775±0,007 d
Ga-67	X, $\gamma$ , e <sup>-</sup>	3,259±0,001 d	Ir-192	$\beta$ ; X, $\gamma$	73,825±0,017 d
Ge-71	X	11,43±0,03 d	Au-198	$\beta$ ; X, $\gamma$	2,6943±0,0008 d
Kr-79	X, $\beta^+$ , $\gamma$	35,04±10 h	Hg-197	X, $\gamma$ , e <sup>-</sup>	2,6708±0,0083 d
Sr-85	X, $\gamma$	64,849±0,004 d	Tl-202	X, $\gamma$ , e <sup>-</sup>	3,041±0,004 d
Mo-99	$\beta$ ; X, $\gamma$	2,7471±0,0008 d	Pb-210	$\alpha$ , $\beta$ ; X, e <sup>-</sup>	22,3±0,2 l
Tc-99	X, $\gamma$	6,007±0,012 h	At-211	$\alpha$ , X, $\gamma$	7,214±0,007 h
Cd-109	X, $\gamma$ , e <sup>-</sup>	462,6±0,7 d	Th-232	$\alpha$ , X, $\gamma$ , e <sup>-</sup>	(140,5±0,06) ·10 <sup>9</sup> l
In-111	X, $\gamma$	2,8047±0,0005 d	Th-234	$\beta$ ; X, $\gamma$ , e <sup>-</sup>	24,10±0,03 d
Sb-125	$\beta$ ; X, $\gamma$	2,7590±0,0016 l	Pa-231	$\alpha$ , X, $\gamma$	32760±110 l
I-123	X, $\gamma$	13,21±0,03 h	U-233	$\alpha$ , X, $\gamma$	(159,2±0,2) ·10 <sup>3</sup> l
I-125	X, $\gamma$ , e <sup>-</sup>	59,43±0,06 d	U-235	$\alpha$ , X, $\gamma$	(704±1) ·10 <sup>6</sup> l
I-131	$\beta$ ; X, $\gamma$	8,021±0,001 d	U-238	$\alpha$ , X, $\gamma$ , n(SF)	(4,47±0,02) ·10 <sup>9</sup> l
Xe-133	$\beta$ ; X, $\gamma$ , e <sup>-</sup>	5,244±0,004 d	Pu-237	$\alpha$ , X, $\gamma$	45,17±0,06 d
Cs-137	$\beta$ ; X, $\gamma$	30,17±0,16 l	Pu-238	$\alpha$ , X, $\gamma$ , n(SF)	87,1±0,1 l
Ba-133	X, $\gamma$ , e <sup>-</sup>	10,57±0,04 l	Pu-239	$\alpha$ , X, $\gamma$	24100±30 l
Ce-144	$\beta$ ; X, $\gamma$	285,0±0,02 d	Pu-240	$\alpha$ , X, $\gamma$ , n(SF)	6560±10 l
Sm-153	$\beta$ ; X, $\gamma$ , e <sup>-</sup>	1,928±0,001 d	Am-241	$\alpha$ , X, $\gamma$	432,7±0,6 l
Gd-153	X, $\gamma$	241,6±0,2 d	Cm-242	$\alpha$ , X, $\gamma$ , n(SF)	162,79±0,09 d
Hf-175	X, $\gamma$	70±2 d	Cm-244	$\alpha$ , X, $\gamma$ , n(SF)	18,1±0,1 l

h – godziny, d – dni, l – lata

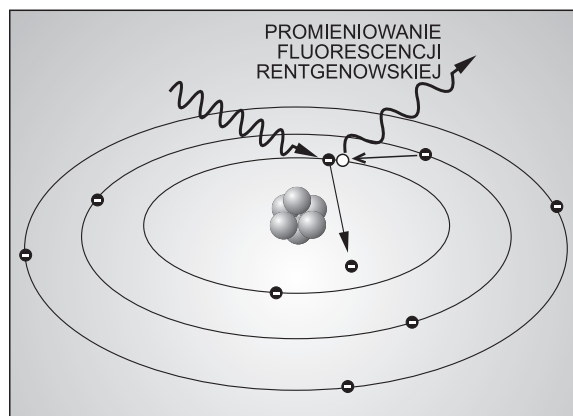
e<sup>-</sup> i n(SF) znaczą odpowiednio elektron oraz neutron z rozszczepienia spontanicznego

Widzimy więc, iż Roentgen podczas swoich eksperymentów z rurą wyładowczą i promieniami katodowymi (tj. elektronami) miał do czynienia z dwoma ww. mechanizmami wytwarzania promieniowania rentgenowskiego: przyhamowanie elektronu w polu jądra atomowego i wybite elektronu z wewnętrznej powłoki (blisko jądra) atomu. I jak można zauważyć, to właśnie te dwa mechanizmy emisji promieniowania rentgenowskiego stały się niejako podstawą jego definicji ujętej w normie PN-EN [1].

Emisja charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego może zachodzić również jako zjawisko wtórne wywołane oddziaływaniem promieniowania rentgenowskiego z materią, jako skutek efektu fotoelektrycznego – przypadek (e). Skoro tylko energia fotonu promieniowania pierwotnego (padającego) przewyższa wartość niezbędną dla uwolnienia elektronów z wewnętrznych powłok atomu, promieniowanie wtórne (charakterystyczne) jest całkowicie niezależne od energii promieniowania padającego.

Z chwilą odkrycia zjawiska promieniotwórczości pierwiastków (Henri Becquerel 1896 r.), do czego niewątpliwie przyczyniły się same badania nad promieniowaniem rentgenowskim, stwierdzono także występowanie promieniowania rentgenowskiego towarzyszącego rozpadom jąder promieniotwórczych – tabela 1. Promieniowanie to wynika stąd, iż w przemianach promieniotwórczych  $\alpha$ ,  $\beta$  zmienia się liczba atomowa (powstaje nowy pierwiastek chemiczny), a to z kolei wymaga przebudowy powłok elektronowych atomu, czemu towarzyszy promieniowanie charakterystyczne obejmujące zakres energii promieniowania rentgenowskiego (<120 keV). Promieniowanie to bywa nieistotne, gdyż znajduje się w tle silnego promieniowania  $\alpha$  czy  $\beta$ . Ponadto promieniowanie rentgenowskie jest emitowane podczas przemiany jądrowej zwanej wychwytem elektronu (promieniowanie charakterystyczne), bądź w wyniku konwersji wewnętrznej (promieniowanie charakterystyczne).

Wychwyt elektronu jest procesem konkurencyjnym do przemiany  $\beta^+$ . Przy pewnych warunkach energetycznych jądra, z najbliższej jądra powłoki K zostaje wyrwany elektron, który z kolei „neutralizuje” proton jądra, dając w sumie neutron. Wolne miejsce w powłoce K po zaabsorbowanym elektronie zostaje wypełnione przez elektrony spadające z dalszych (od jądra) warstw. Efektem tego jest powstanie promieniowania rentgenowskiego. Zanika ono zależnie od okresu połowicznego rozpadu jąder danego rodzaju. Przykładem może być izotop jodu I-125, dla którego 100% rozpadu zachodzi poprzez wychwyt K, któremu towarzyszą promienie *gamma* o energii 35,4 keV. W efekcie



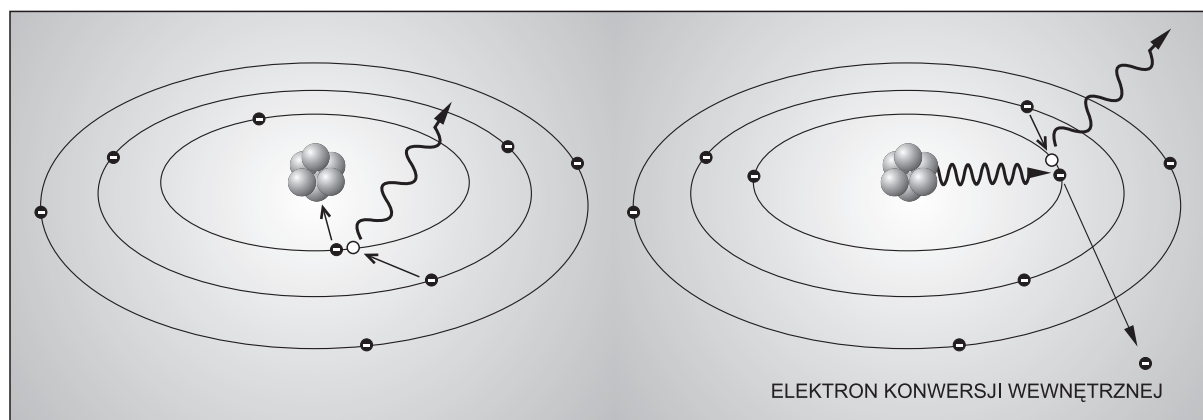
Rys. 5. Emisja promieniowania fluorescencji rentgenowskiej

wychwytu K powstaje promieniowanie rentgenowskie telluru Te-125 o energii 27,47 keV. Warto w tym miejscu wspomnieć, iż wychwyt K ma miejsce także przy rozpadzie dobrze nam znanych w radiografii źródeł promieniotwórczych, jakim jest iryd Ir-192 (38%) czy selen Se-75 (100%). Jednakże udział promieniowania rentgenowskiego ze względu na silne promieniowanie *gamma* jest w tych źródłach pomijany. Z kolei izotop gadolinu Gd-153 (stosowany m.in. w aparatach defektoskopowych firmy Sentinel) traktowany często jako źródło promieniowania rentgenowskiego, w rzeczywistości oprócz promieniowania rentgenowskiego o energii 41 keV, jest także silnym źródłem miękkiego promieniowania  $\gamma$  o energii 102 keV.

W niektórych przypadkach, gdy nie jest możliwa emisja fotonu promieniowania  $\gamma$ , nadmiar energii jądra może zostać przekazany elektronowi z powłoki K, który zostaje wyrwany i wyrzucony z atomu. Zjawisko to nosi nazwę konwersji wewnętrznej. Emitowany elektron zwany elektronem konwersji unosi z atomu ściśle określoną energię, będącą różnicą energii fotonu X i energii wiązania elektronu w atomie. Miejsce jego zajmują elektrony z innych powłok (np. L i M), z jednoczesną emisją miękkiego promieniowania rentgenowskiego.

Jeśli chodzi o promieniowanie synchrotronowe, które charakteryzuje się bardzo ciekawymi, nietypowymi właściwościami, to jak już wspomniano na wstępie generowane jest ono podczas przyspieszenia naładowanych cząstek (głównie relatywistycznych elektronów) na torach krzywoliniowych; zaobserwowano je po raz pierwszy w 1947 r. właśnie w synchrotronie. Nie wdając się w bliższe omawianie procesu wytwarzania promieniowania synchrotronowego<sup>9</sup>, warto wymienić tylko właściwości tego promieniowania:

<sup>9</sup> Planowana jest w Polsce w Krakowie budowa Narodowego Centrum Promieniowania Synchrotronowego.



Rys. 6. Schemat przedstawiający wychwyt elektronu (a) oraz zjawisko konwersji wewnętrznej (b)

Tabela 2. Nuklidy promieniotwórcze rozpadające się wyłącznie poprzez wychwyt elektronu i emitujące bardzo słabe lub zupełnie nie emitujące promieniowania  $\gamma$  [11]

Nuklid	Okres połowicznego rozpadu	Promieniowanie rentgenowskie		Energia wychwyty elektronu [keV]
		Pierwiastek	$K_{\alpha 1}$ [keV]	
Ar-37	35 dni	Cl	2,662	815
Cr-51	27,8 dnia	V	4,952	752
<b>Fe-55</b>	<b>2,6 lat</b>	<b>Mn</b>	<b>5,898</b>	<b>217</b>
Ge-71	11,4 dnia	Ga	9,251	233
Pd-103	17 dni	Rh	20,214	560
<b>Cd-109</b>	<b>453 dni</b>	<b>Ag</b>	<b>22,16</b>	<b>170</b>
I-125	60 dni	Te	27,47	149
Cs-131	10 dni	Xe	29,80	360
Pm-145	17,7 lat	Nd	37,36	140
Sm-145	340 dni	Pm	38,65	650
Ta-179	600 dni	Hf	55,76	119
W-181	140 dni	Ta	57,52	190
Pb-205	$5 \cdot 10^7$ lat	Tl	$L_{\alpha 1} = 10,27$	30

Wytłuszczoną czcionką oznaczono nuklidy stosowane w przenośnych analizatorach składu chemicznego w miejsce lampy rentgenowskiej.

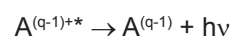
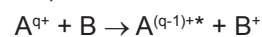
- posiada ono szeroki zakres spektralny rozciągający się od promieniowania w dalekiej podczerwieni ( $\lambda \cong 10^5 \text{ \AA}$  i energii  $E \cong 10^{-1} \text{ eV}$ ) do twardego promieniowania rentgenowskiego ( $\lambda < 1 \text{ \AA}$  i energii powyżej 10 keV); pokrywa ono zakres widmowy, w którym długości fali elektromagnetycznej odpowiadają skali wielkości obiektów od atomu do złożonych układów molekularnych, a związane z nim energie fotonów pokrywają skalę energetyczną wzbudzeń w tych obiektach – oddziaływań o naturze elektromagnetycznej;
- wykazuje bardzo dobrą kolimację (na drodze 1 m wiązka ulega rozbieżności tylko o 0,1 – 1 mm);
- charakteryzuje się dużym natężeniem, a wobec małego obszaru z którego następuje emisja, oznacza to również nadzwyczajną światłość powierzchniową źródła (w obszarze rentgenowskim widma, jego natężenie o wiele rzędów wielkości przewyższa natężenie promieniowania emitowanego przez lampy rentgenowskie);
- promieniowanie synchrotronowe jest emitowane w formie krótkich impulsów, których czas trwania jest zwykle poniżej jednej nanosekundy;
- promieniowanie synchrotronowe w płaszczynie zakrzywionego toru jest spolaryzowane liniowo.

Wiele mechanizmów wytwarzania promieniowania rentgenowskiego wymienionych na wstępie występuje w naturze [12] – tj. m.in. w przestrzeni kosmicznej (gwiazdy neutronowe, korony gwiazdowe, pozostałości po supernowych, gaz w gromadach galaktyk, obszary gorącego gazu ściśniętego falą uderzeniową), aczkolwiek do ich zaobserwowania należało poczekać około 50 lat, od momentu odkrycia tego promieniowania przez W. Roentgena. Od dawna wprawdzie podejrzewano, że istnieją w kosmosie źródła promieniujące

w tym zakresie (korony gwiazdowe, gaz w gromadach galaktyk, gwiazdy neutronowe, pozostałości po supernowych), ale brak możliwości obserwacji tego zakresu widma z powierzchni ziemi skutecznie ograniczał badania. Przyczyną tego jest fakt, iż docierające z kosmosu promieniowanie rentgenowskie jest prawie całkowicie absorbowane przez warstwę ziemskiej atmosfery i trzeba było czekać na wyniesienie detektorów tego promieniowania poza warstwę atmosfery. Otóż należy nadmienić, że promieniowanie rentgenowskie powstaje również wówczas, kiedy np. rozgrzana plazma wiruje wokół czarnej dziury, zderza się z powierzchnią gwiazdy neutronowej albo jest porywana przez falę uderzeniową eksplodującej gwiazdy. Może też powstawać, gdy ściskany niewyobrażalną grawitacją gaz nagrzewa się do temperatury rzędu miliona stopni. Ciała ogrzane do temperatury pokojowej promieniują głównie w zakresie podczerwieni, a ciała ogrzane do temperatury kilku-kilkunastu tysięcy stopni większość energii wypromieniowują w zakresie światła widzialnego. Ale istnieją w kosmosie również obiekty o temperaturze dziesiątków-setek, a nawet milionów stopni – one wypromieniowują głównie ultrafiolet, promieniowanie rentgenowskie, a nawet promieniowanie gamma. O intensywnym rozwoju astronomii rentgenowskiej świadczą dane zawarte w tabeli 3.

W 1966 r. stwierdzono, że także komety emitują promieniowanie rentgenowskie co zaskoczyło astronomów, którzy wcześniej nie przewidzieli tego fenomenu. Źródłem tego promieniowania<sup>10</sup> jest wymiana ładunków pomiędzy ciężkimi jonami pochodzącymi z wiatru słonecznego wskutek ich zderzenia z atomami gazów znajdującymi się wokół komety. Ze względu na całkowicie odmienny mechanizm emisji promieniowania rentgenow-

skiego od dotychczas poznanych, warto go bliżej omówić. Mechanizm ten można przedstawić jako proces wymiany ładunków pomiędzy ciężkim jonem a neutralnym atomem lub cząsteczką, co prowadzi do powstania stanu wzbudzonego ciężkiego jonu, a następnie jako proces powrotu ze stanu wzbudzonego do podstawowego poprzez emisję miękkiego promieniowania rentgenowskiego (0,3 – 2 keV), lub nadfioletowego:



gdzie: A stanowiąc mogą jony np.:  $O^{7+}$ ,  $O^{6+}$ ,  $O^{5+}$ ,  $C^{+6}$ ,  $C^{+5}$ ,  $N^{+6}$ ,  $Fe^{13+}$ ,  $Fe^{12+}$

B mogą to być atomy lub cząsteczki:  $H_2O$ , OH, CO, O lub H.

\* – oznacza wzbudzony energetycznie stan jonu.

Większość obserwowanych fotonów wskutek wyżej opisanego procesu posiada energię około 500 eV i poniżej. Przebieg tego procesu udało się również zaobserwować w 2003 r. w warunkach laboratoryjnych w Lawrence Livermore National Laboratory (USA).

W latach 50. ubiegłego wieku odkryto z kolei zjawisko emisji promieniowania rentgenowskiego wskutek pochłaniania mezonów (tj. nietrwałych cząstek o masie pośredniej pomiędzy masą elektronu a masą protonu) przez atomy [13]. Otóż istnieje określone prawdopodobieństwo powstania tzw. atomów mezonowych, tj. atomów w których ujemne mezony  $\pi^-$  lub  $\mu^-$  zostają schwyte na jedną z orbit kwantowych. Następnie, podczas przejścia mezonów z orbity o wyższej energii na orbitę o niższej energii emitowane zostaje, podobnie jak w przypadku elektronów, promieniowanie rentgenowskie.

Tabela 3. Poznane źródła promieniowania [14]

Rok	Liczba poznanych źródeł promieniowania rentgenowskiego	W oparciu o
1960	0	lub 1 jeśli przyjąć Słońce
1962	1	eksperymenty z raketami
1965	10	eksperymenty z raketami
1970	60	eksperymenty z raketami i balonami
1974	160	satelita Uhuru
1980	640	katalog P.R. Amnuela i in.
1984	840	satelita HEAO
1990	8000	satelita Einstein i Exosat
2000	220000	satelita Rosat
2006	500000	jak wyżej + XMM-Newton + Chandra
ok. 2010	1000000 (przewidywania)	jak wyżej + XMM-Newton + Chandra

<sup>10</sup> Źródła te w literaturze światowej określane są jako SWCX – Solar Wind Charge eXchange.



Źródła emisji odpowiedzialne za promieniowania rentgenowskie w Kosmosie to:

4. Promieniowanie synchrotronowe – oddziaływanie wysokoenergetycznych elektronów z polem magnetycznym;
4. Odwrotny efekt Comptona – zderzenie relatywistycznego elektronu z niskoenergetycznym fotonem;
4. Promieniowanie hamowania – promieniowanie wysyłane przez elektrony poruszające się w gęstej i gorącej plazmie;
4. Procesy jądrowe – rozpad jąder pierwiastków promieniotwórczych, deekscytacja jąder wzbudzonych.

Jeżeli chodzi o urządzenia techniczne emitujące celowo (w sposób zamierzony) promieniowanie rentgenowskie, są to:

- lampy rentgenowskie,
- akceleratory cząstek,
- izotopowe źródła promieniowania rentgenowskiego,
- źródła przetwornikowe  $\beta$ -X<sup>11</sup>
- bomba termojądrowa (wodorowa), gdzie promieniowanie rentgenowskie uzyskane wskutek wysokiej temperatury z rozszczepienia jąder uranu lub plutonu wykorzystane jest do procesu sprężenia wodoru.

Jako, że dwa pierwsze z nich są radiologom dobrze znane, a trzecie zostało wcześniej przedstawione, zaprezentuję tylko kilka uwag na temat czwartego urządzenia. Powstające w wyniku przemian jądrowych pierwiastka promieniotwórczego promienie  $\beta$  (strumień wysokoenergetycznych elektronów) wykorzystywane są do bombardowania specjalnie przygotowanego materiału docelowego. Rezultatem tego bombardowania jest wytwarzanie ciągłego (wewnętrznego promieniowania hamowania) i charakterystycznego promieniowania. Dla uzyskania możliwie czystego, monochromatycznego promieniowania rentgenowskiego należy stosować promieniowanie o możliwie małej energii (oczywiście wyższej jednak od energii promieniowania charakterystycznego, które ma być wytwarzane), gdyż wówczas udział promieniowania hamowania w widmie promieni rentgenowskich będzie stosunkowo niewielki. Źródła czystego promieniowania  $\beta$  wykorzystywane w praktyce radiograficznej do wzbudzania promieniowania rentgenowskiego przedstawiono w tabeli 4.

Warto też wspomnieć, iż polska norma PN-86/J-80001 [3] podaje sposób na obliczanie grubości osłon, m.in. przed promieniowaniem hamowania Sr-90/Y-90.

Tabela 4. Izotopowe źródła promieniowania hamowania

Izotop	$E_{\max}$ MeV	Okres połowicznego rozpadu
Sr-90/Y-90	0,546/2,27	28 lat/64 h
Tl-204	0,77	3,8 lat
Pm-147	0,22	2,6 lat
Kr-85	0,670	10,7 lat

#### 4. ZAKOŃCZENIE

Przedstawione powyżej mechanizmy odpowiedzialne za emisję promieniowania rentgenowskiego wskazują na wielorakość zarówno źródeł naturalnych jego powstawania jak i źródeł stworzonych (wykorzystanych) przez człowieka. Dlatego też i z tego względu krótka, zwięzła definicja promieniowania rentgenowskiego winna się ograniczyć wyłącznie do opisu fizycznej natury tegoż promieniowania.

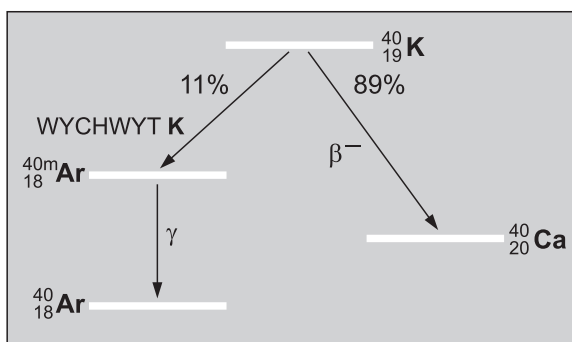
Proponowana przez autorów opracowania [9] definicja promieniowania rentgenowskiego stosowana w dziedzinie badań nieniszczących jest następująca: **Promieniowanie rentgenowskie jest to promieniowanie elektromagnetyczne o długości fali w granicach 50-0,0001 nm, a więc około tysiąc razy mniejszej niż długość promieniowania widzialnego, co odpowiada energii fotonów w granicach 25 eV – 12,4 MeV.** Uzupełnienie: *W praktyce radiograficznej podstawowym źródłem promieniowania rentgenowskiego jest lampa rentgenowska.*

Na zakończenie warto sobie uświadomić i ten zaskakujący fakt, iż również sam człowiek jest słabym źródłem promieniowania rentgenowskiego ze względu na zawarty w jego ciele promieniotwórczy izotop potasu K-40 (jego zawartość stanowi zaledwie 0,00119% naturalnego potasu) który rozpada się (11%) poprzez wychwyt K, a więc towarzyszy mu emisja promieniowania rentgenowskiego (2,96 - 3,19 keV). Całkowita aktywność K-40 w ciele ludzkim wynosi ok. 4500 Bq<sup>12</sup>, okres połowicznego rozpadu tego izotopu jest długi i wynosi 1,277×10<sup>9</sup> lat.

Grzegorz Jeziński  
Politechnika Opolska

<sup>11</sup> Autor celowo ze względu na praktyczny zapis użył określenie promieniowanie X zamiast rentgenowskie.

<sup>12</sup> Całkowita aktywność izotopów zawartych w ciele ludzkim wynosi ok. 9100 Bq, co daje ok. 130 Bq/kg masy.



Rys.7. Schemat rozpadu promieniotwórczego izotopu K-40

## LITERATURA

1. PN-EN 1330-03 Badania nieniszczące. Terminologia. Terminy stosowane w radiograficznych badaniach przemysłowych.
2. PN -75/J-01003/01 Technika jądrowa. Nazwy i określenia. Promieniowanie jonizujące
3. PN-86/J-80001 Materiały i sprzęt ochronny przed promieniowaniem X i gamma. Obliczanie osłon stałych
4. Nowa Encyklopedia Powszechna; PWN; Warszawa, 1966 r.
5. Encyklopedia Techniki – Energia jądrowa; WNT, Warszawa, 1970 r.
6. Encyklopedia Techniki – Podstawy Techniki; WNT 1974 r.
7. Fizyka współczesna – Paul W. Hewitt; PWN, Warszawa, 2001 r.
8. Leksykon Naukowo-Techniczny; PWN, Warszawa, 1989 r.
9. K. Besztak, G. Jezierski – Badania Nieniszczące. Metody radiologiczne – Terminologia; Biuro Gamma; Warszawa, 2007 r.
10. 10.CLEFS Nr 34 La radioactivite; CEA, Francja, 1997 r.
11. Norman A. Dyson – Promieniowanie rentgenowskie w fizyce atomowej i jądrowej ; PWN, Warszawa, 1978
12. Materiały Krajowej Konferencji Badań Radiograficznych – Popów 2005; K. Besztak; Naturalne kosmiczne źródła promieniowania rentgenowskiego
13. Julian Auleytner – Promienie Roentgena wysyłane w aktach wchłaniania mezonów przez atomy – Postępy Techniki T. IV z. 4
14. [http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/heasarc/headates/how\\_many\\_xray.html](http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/heasarc/headates/how_many_xray.html)



## POTRZEBA I UWARUNKOWANIA BUDOWY ELEKTROWNI JĄDROWYCH W POLSCE

W dniach 13-15 maja odbyły się w Poznaniu Międzynarodowe Targi Energetyki - EXPOPOWER 2008. Ich organizatorem były Międzynarodowe Targi Poznańskie sp. z o.o, zaś patronat honorowy sprawował Przewodniczący Parlamentarnego Zespołu ds. Energetyki. Opiekę nad tym wydarzeniem objęło również Ministerstwo Gospodarki i takie organizacje, jak: Stowarzyszenie Elektryków Polskich, Towarzystwo Gospodarcze Polskie Elektrownie, Izba Gospodarcza Energetyki i Ochrony Środowiska, Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej.

W programie Targów przewidziano wiele imprez towarzyszących: konferencji, debat, wieczorów branżowych, wręczania medali i wyróżnień za najlepsze, najbardziej innowacyjne produkty.

Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej zorganizowało konferencję na temat możliwości i warunków powstania elektrowni jądrowych w Polsce w świetle polityki proekologicznej Unii Europejskiej oraz specyfiki energetyki krajowej. Tytuł konferencji : „Potrzeba i uwarunkowania budowy elektrowni jądrowych w Polsce”.

W programie konferencji znalazły się następujące referaty:

- **Konieczność rozwoju energetyki w Polsce w świetle polityki Unii Europejskiej**  
*Mirosław Duda – Agencja Rynku Energii*
- **Racjonalne przesłanki dywersyfikacji źródeł energii elektrycznej**  
*Jacek Malko – Politechnika Wrocławska*
- **Uwarunkowania prawne energetyki jądrowej**  
*Maciej Jurkowski – Państwowa Agencja Atomistyki*
- **Aspekty systemowe przyłączania źródeł dużej mocy do Krajowego Systemu Elektroenergetycznego**  
*Elżbieta Rzemieniec-Baster, Jan Sawicki – Energoprojekt Kraków*
- **Przyłączanie różnego rodzaju źródeł z punktu widzenia operatora sieci Elektroenergetycznej**