

Zastosowanie metod eksperymentalnych fizyki współczesnej w edukacji szkolnej

Aldona Kubala-Kukuś, Małgorzata Wysocka-Kunisiz

Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach, Instytut Fizyki

1. Wstęp

Wybrane zagadnienia fizyki atomowej i jądrowej znajdują się w treściach nauczania podstawy programowej przedmiotu Fizyka na IV etapie (liceum), zarówno w zakresie podstawowym jak i rozszerzonym [1]. Również wątki tematyczne wymieniane w podstawie programowej przedmiotu Przyroda (IV etap – liceum) niejednokrotnie odwołują się do fizyki atomowej i jądrowej [1]. Nie ulega wątpliwości, że możliwość wykorzystania eksperymentu czy też doświadczenia na etapie realizacji tych treści programowych w każdym przypadku wzbogaca proces edukacyjny. Jednakże doświadczenia i eksperymenty oparte o fizykę atomową i jądrową są chyba najtrudniejszymi do przygotowania i przeprowadzenia w warunkach szkolnych. Wieloletnia, mniej lub bardziej sformalizowana, współpraca pracowników Instytutu Fizyki Uniwersytetu Jana Kochanowskiego w Kielcach (UJK) ze szkołami gimnazjalnymi i ponadgimnazjalnymi wskazuje na ich szczególne zainteresowanie możliwością pracy eksperymentalnej w zakresie fizyki atomowej oraz fizyki jądrowej. Potencjał dydaktyczny Instytutu Fizyki w tym zakresie związany jest zarówno z wykorzystaniem doświadczeń fizyki jądrowej przygotowanych w ramach dedykowanej studentom fizyki pracowni jądrowej, jak i metod eksperymentalnych fizyki współczesnej wykorzystywanych w działalności naukowej pracowników Zakładu Fizyki Atomowej Instytutu Fizyki UJK.

Celem prezentowanej pracy jest przedstawienie wykorzystania w edukacji szkolnej metod eksperymentalnych fizyki atomowej i jądrowej dostępnych w Instytucie Fizyki UJK. W pracy zostaną omówione podstawy fizyczne wykorzystywanych metod eksperymentalnych i układów doświadczalnych w odniesieniu do podstawy programowej przedmiotu Fizyka oraz podstawy programowej przedmiotu Przyroda. Zaprezentowane będą możliwości technik badawczych spektroskopii rentgenowskiej oraz przykładowe zastosowania przede wszystkim w kontekście projektów edukacyjnych, w ramach których wykorzystano te metody eksperymentalne.

2. Opis metod eksperymentalnych i doświadczalnych

2.1 Metody spektrometrii rentgenowskiej

Wykorzystane metody eksperymentalne fizyki współczesnej są w zakresie fizyki atomowej technikami badawczymi spektroskopii rentgenowskiej, będącej działem fizyki atomowej badającym struktury energetyczne (budowę i właściwości)

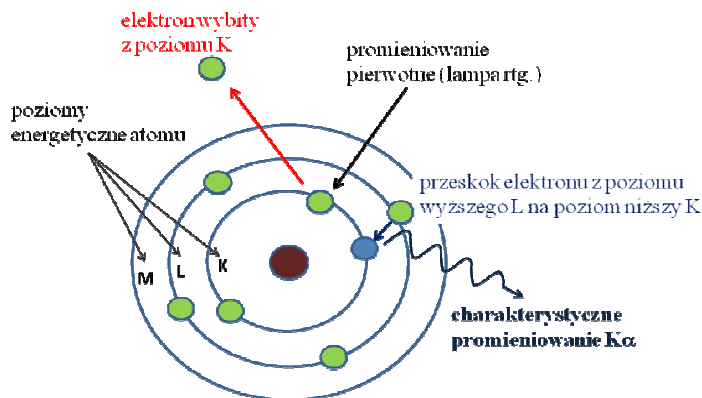
atomów poprzez obserwację i analizę rozkładu energii (widm) promieniowania rentgenowskiego emitowanego, pochłanianego lub rozpraszanego przez atom [2]. Metody eksperymentalne mające swe podstawy fizyczne w zjawiskach fizyki atomowej wykorzystywane są szeroko w wielu dziedzinach nauki [3]. Szczególnym przykładem metod spektrometrycznych są techniki badawcze spektrometrii rentgenowskiej, obejmującej badanie materii przy użyciu promieniowania rentgenowskiego. Promieniowanie rentgenowskie jest promieniowaniem elektromagnetycznym o długość fali w zakresie od 0.01 do 1 nm, co odpowiada energii promieniowania w zakresie 1-100 keV [2].

Jednym z podstawowych zastosowań metod spektrometrii rentgenowskiej jest ich wykorzystanie do analizy składu pierwiastkowego oraz chemicznego różnorodnych próbek. Technika analizy pierwiastkowej jest rentgenowska analiza fluorescencyjna XRF (X-Ray Fluorescence) [5, 6] oraz jej modyfikacja rentgenowska analiza fluorescencyjna z całkowitym odbiciem wiązki padającej TXRF [7].

Instytut Fizyki Uniwersytetu Jana Kochanowskiego w Kielcach dysponuje urządzeniami badawczymi (spektrometry rentgenowskie) realizującymi metody TXRF oraz WDXRF (rentgenowska analiza fluorescencyjna z dyspersją długości fali) [5-8]. Typowe wykorzystanie tych metod to analiza pierwiastkowa różnorodnych próbek biologicznych, środowiskowych i przemysłowych, z różnymi celami badań prowadzonych we współpracy z wieloma ośrodkami naukowymi.

2.1.1 Podstawy fizyczne metody WDXRF i TXRF

Techniki pomiarowe WDXRF i TXRF oparte są na zjawisku wzbudzenia przez promieniowanie rentgenowskie promieniowania fluorescencyjnego (promieniowania charakterystycznego) w atomach badanej próbki (Rys. 1).

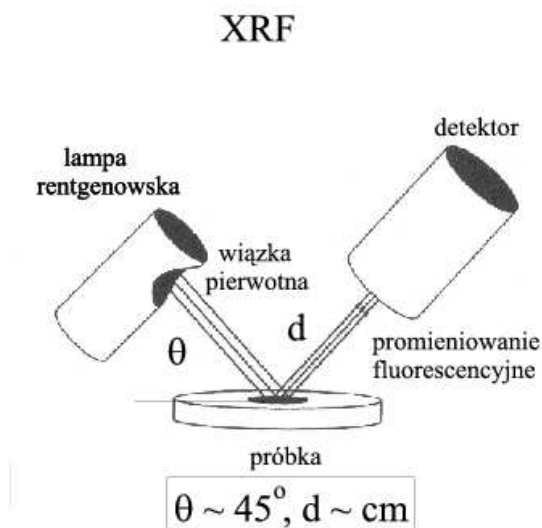


Rys. 1: Wzbudzenie promieniowania fluorescencyjnego (charakterystycznego) emitowanego przez atom.

Emitowane z lampy rentgenowskiej promieniowanie rentgenowskie (pierwotne) padające na atom znajdujący się w badanej próbce wybija elektron z wewnętrznej powłoki atomowej (np. powłoki K). Warunkiem wybijania elektronu jest aby energia padającego fotonu przewyższała energię wiązania elektronu na danym poziomie. Powstała w wyniku jonizacji luka zostaje zapełniona przez elektron z wyższej powłoki (np. powłoki L). Temu przejściu towarzyszy emisja promieniowania charakterystycznego, którego energia równa jest różnicy energii poziomów pomiędzy, którymi zachodzi przejście elektronu. Zgodnie z prawem Moseleya [2] energia promieniowania charakterystycznego zależy od liczby atomowej pierwiastka, z którego promieniowanie zostało wyemitowane.

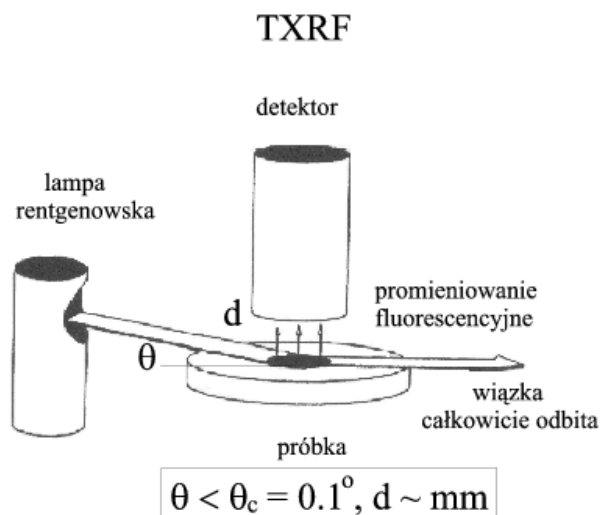
Powyższe zjawisko nazywane jest zjawiskiem fotoelektrycznym wewnętrznym [2]. Emitowane z próbki promieniowanie charakterystyczne rejestruje się w postaci tzw. rentgenowskich widm promieniowania charakterystycznego, czyli zależności liczby (intensywności) emitowanych fotonów od ich energii. Wyznaczając energię tego promieniowania możliwe jest określenie, z jakiego atomu zostało ono wyemitowane, a określając dodatkowo intensywność promieniowania charakterystycznego możliwa jest identyfikacja ilościowa pierwiastków zawartych w badanej próbce.

Geometria układu pomiarowego klasycznej rentgenowskiej analizy fluorescencyjnej (XRF) przedstawiona jest na Rys. 2. Wiązka promieniowania rentgenowskiego emitowana z lampy rentgenowskiej (wiązka pierwotna) kierowana jest na badaną próbkę pod kątem $\sim 45^\circ$. Detektor rejestrujący promieniowanie fluorescencyjne ustawiony jest pod kątem $\sim 45^\circ$.



Rys. 2: Geometria układu pomiarowego klasycznej rentgenowskiej analizy fluorescencyjnej XRF [4].

Dokonując modyfikacji układu pomiarowego, tzn. kierując promieniowanie pierwotne pod bardzo małym kątem (poniżej tzw. kąta krytycznego θ_c , będącego uzupełnieniem do 90° kąta granicznego) oraz lokalizując detektor blisko próbki pod kątem 90° , otrzymuje się geometrię układu pomiarowego metody TXRF [7] (Rys. 3). W geometrii tej wykorzystywane jest zjawisko całkowitego odbicia wiązki padającej, dzięki któremu otrzymuje się znaczne ograniczenie przeszkadzającego promieniowania tła, a tym samym znaczną poprawę granicy wykrywalności metody pomiarowej z poziomu $\sim 1 \mu\text{g/g}$ (ppm), charakterystycznego dla klasycznej rentgenowskiej analizy fluorescencyjnej, do poziomu $\sim 1 \text{ng/g}$ (ppb).



Rys. 3: Geometria układu pomiarowego klasycznej rentgenowskiej analizy fluorescencyjnej TXRF [4]. Promieniowanie z lampy rentgenowskiej pada pod kątem θ mniejszym od kąta krytycznego θ_c .

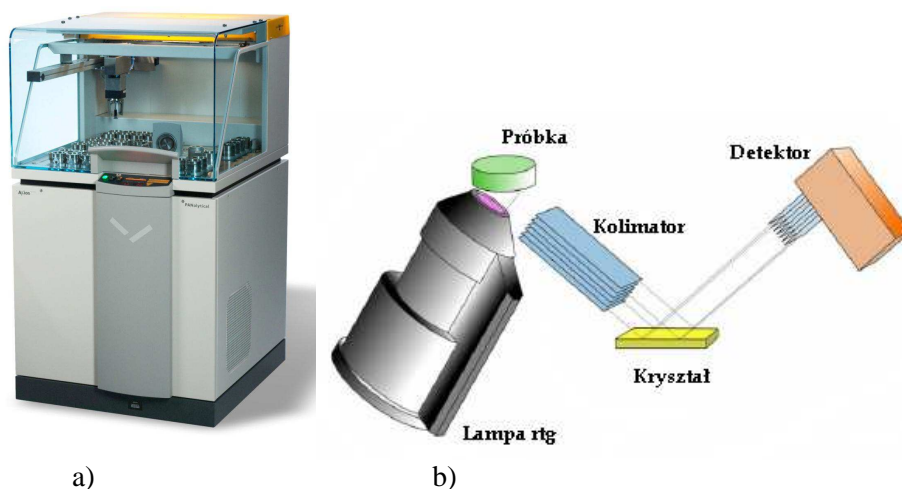
Detekcja promieniowania charakterystycznego może być zrealizowana w module z dyspersją energii lub też w układzie z dyspersją długości fali [5, 6]. W układzie z dyspersją energii emitowane przez pierwiastki zawarte w próbce promieniowanie o energii proporcjonalnej do kwadratu liczby atomowej Z pierwiastka rejestrowane jest przez detektor, w którym powstają impulsy o wysokości zależnej od energii promieniowania charakterystycznego. Analizator wielokanałowy separuje impulsy o różnej wysokości. W układzie z dyspersją długości fali promieniowanie emitowane z próbki pada na kryształ analizujący, który odbija tylko promieniowanie o długości fali spełniającej równanie Bragga [2]. Odbite promieniowanie rejestrowane jest następnie przez detektor. Zaletą spektrometrii z dyspersją długości fali jest: optymalizacja wzbudzenia i kąta dyspersji indywidualnie dla każdej linii widma, większa intensywność, doskonała roz-

dzielczość spektralna, niskie poziomy oznaczalności. Wadą jest dłuższy czas analizy jakościowej, skomplikowana budowa i wysoka cena spektrometrów.

Wykorzystywana w analizach pierwiastkowych metoda XRF zrealizowana w układzie z dyspersją długości fali nazywana jest dalej metodą WDXRF. Metoda TXRF jako sposób detekcji wykorzystuje dyspersję energii.

2.1.2 Układ pomiarowy metody WDXRF (spektrometr AXIOS)

Wykorzystywana w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Jana Kochanowskiego w Kielcach metoda WDXRF analizy składu pierwiastkowego realizowana jest w spektrometrze rentgenowskim AXIOS firmy PANalytical [9, 10]. Zdjęcie spektrometru AXIOS oraz schemat układu pomiarowego przedstawione są na Rys. 4 a) i b).



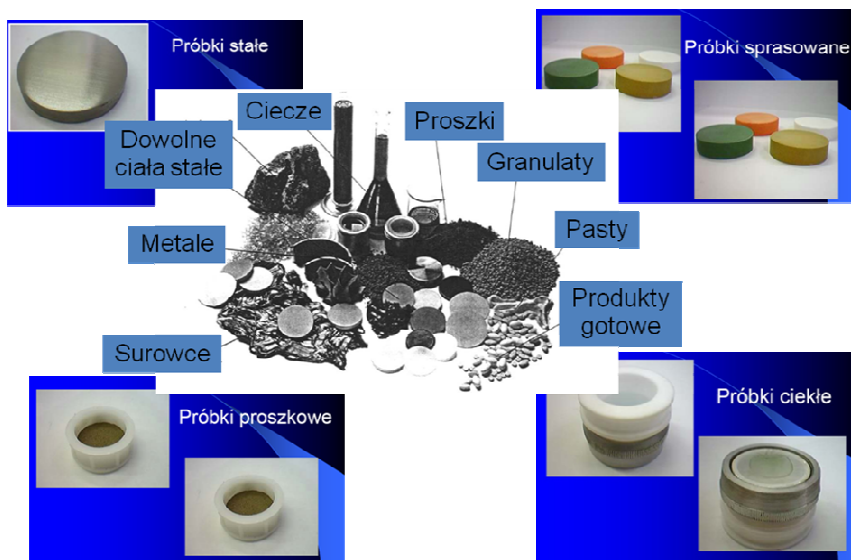
Rys. 4: Wygląd zewnętrzny (a) oraz schemat układu pomiarowego (b) spektrometru rentgenowskiego AXIOS do określania składu pierwiastkowego metodą rentgenowskiej analizy fluorescencyjnej z dyspersją długości fali (WDXRF) [9].

W spektrometrze tym promieniowanie wzbudzające wytwarzane jest w lampie rentgenowskiej z anodą rodową (Rh), o mocy 2,4 kW. Emitowane z próbki promieniowanie charakterystyczne, formowane przez układ kolimatorów, pada na kryształ analizujący, który odbija tylko promieniowanie spełniające warunek Bragga [2]. Spektrometr AXIOS wyposażony jest w pięć kryształów: LiF (200), Ge (111), PE (002), PX1, LiF (220), umożliwiających analizę promieniowania w szerokim zakresie długości fali (energii). Detekcja promieniowania odbywa się przy wykorzystaniu dwóch detektorów promieniowania rentgenowskiego: detektora przepływowego (optymalny dla pierwiastków o liczbie

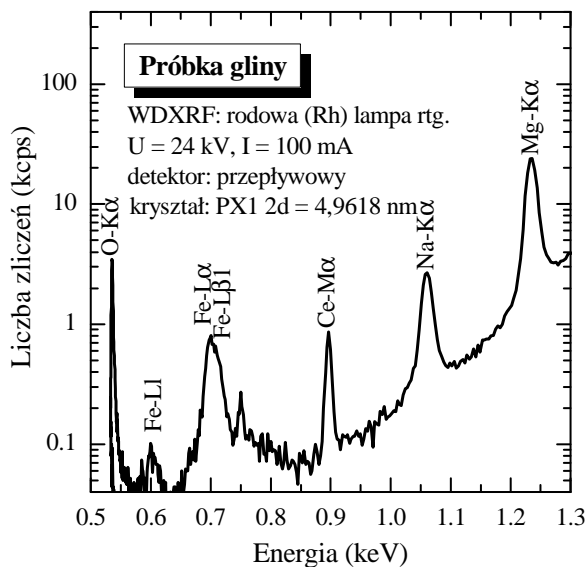
atomowej do żelaza Fe ($Z=26$) i scyntylacyjnego (dla pierwiastków cięższych od Fe). W celu optymalizacji metody pomiarowej dla różnych pierwiastków układ wyposażony jest również w filtry promieniowania pierwotnego z lampy rentgenowskiej.

Przy wykorzystaniu spektrometru AXIOS możliwy jest jednoczesny pomiar koncentracji wielu pierwiastków (od tlenu O do uranu U). Zaletami metody jest nieniszczący charakter analizy, krótki czas oznaczeń (~ 30 min), wykrywalność rzędu kilku $\mu\text{g/g}$ oraz możliwość analizy próbek stałych, proszków oraz cieczy (Rys. 5). W przypadku próbek ciekłych oraz sproszkowanych pomiar przeprowadzany jest w atmosferze helu, próbki stałe mierzone są w próżni. Typowe zastosowania spektrometru rentgenowskiego AXIOS to analiza składu pierwiastkowego gleby, gliny, materiałów geologicznych, osadów rzecznych, minerałów, metali i ich stopów, pyłów, roślinnych i zwierzęcych próbek środowiskowych, wody, farmaceutyków, materiałów ceramicznych czy też materiałów budowlanych.

Granica wykrywalności metody WDXRF w układzie spektrometru AXIOS zależy głównie od rodzaju analizowanej próbki. W ogólności można podać, że jest na poziomie $10 \mu\text{g/g}$ (ppm).



Rys. 5: Rodzaj próbek możliwych do analizy pierwiastkowej przy wykorzystaniu spektrometru AXIOS (metoda WDXRF) [10, 11].



Rys. 6: Przykładowe widmo promieniowania charakterystycznego emitowanego przez próbkę gliny w zakresie energii od 0.5 keV do 1.3 keV, ze zidentyfikowanymi liniami następujących pierwiastków: O, Fe, Ce, Na oraz Mg.

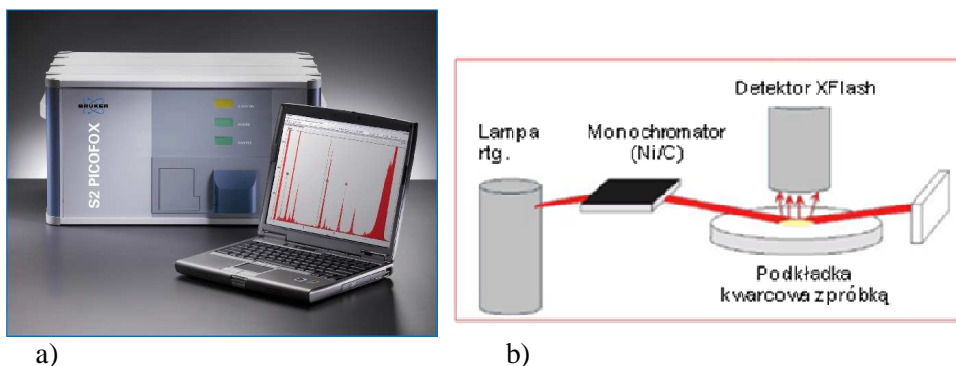
Wynikiem naświetlania próbki promieniowaniem pierwotnym jest zarejestrowanie widm, w różnych zakresach energii promieniowania fluorescencyjnego emitowanego przez atomy badanej próbki. Przykładowe widmo uzyskane dla próbki gliny w zakresie energii od 0.5 keV do 1.3 keV przedstawione jest na Rys. 6. Obserwowane na widmie piki odpowiadają liniom promieniowania charakterystycznego atomów. Położenie linii (jej energia) określa pierwiastek (analiza jakościowa), natomiast wysokość linii określa ilość pierwiastka w próbce (analiza ilościowa). Na przedstawionym widmie zidentyfikowano linie następujących pierwiastków: O (linia O-K α), Fe (linie Fe-LI, Fe-L α , Fe-L β_1), Ce (linia Ce-M α), Na (linia Na-K α) oraz Mg (linia Mg-K α). Linia K α , będąca w rzeczywistości sumą linii K α_1 i K α_2 , odpowiada przejściom elektronów z podpowłok L3 i L2 na powłokę K. Linie serii L to odpowiednio: dla linii LI przejście elektronu z podpowłoki M1na podpowłokę L3, dla linii L α (suma linii L α_1 i L α_2) przejście z M5 i M4 na L3 oraz dla linii L β_1 przejście z M4 na L2 [6].

Ilościową i jakościową analizę widm przeprowadza się przy wykorzystaniu oprogramowania spektrometru: programu SuperQ oraz kalibracji Omnian [8]. Dla przykładu, w analizach próbki gliny określono koncentracje 23 następujących pierwiastków: Al, Ba, Ca, Cr, Cu, Fe, Ga, K, Mg, Mn, Na, Ni, Nb, O, P, Pb, Rb, S, Si, Sr, Ti, Zn oraz Zr, w szerokim zakresie koncentracji: od około

0,001% (dla galu Ga) do około 40% (dla tlenu O). Poziom wykrywalności pierwiastków oszacowano na poziomie 0,001%, czyli 10 $\mu\text{g/g}$ (ppm). Niepewności pomiarowe otrzymanych wartości koncentracji mieszczą się w zakresie 10-15%.

2.1.3 Układ pomiarowy metody TXRF (spektrometr PICOFOX)

Wykorzystywana w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Jana Kochanowskiego w Kielcach metoda TXRF analizy składu pierwiastkowego realizowana jest w spektrometrze rentgenowskim PICOFOX firmy Bruker [11]. Zdjęcie spektrometru PICOFOX oraz schemat układu pomiarowego przedstawione są na Rys. 7 a) i b).



Rys. 7: Wygląd zewnętrzny (a) oraz schemat układu pomiarowego (b) spektrometru rentgenowskiego PICOFOX do określania składu pierwiastkowego metodą rentgenowskiej analizy fluorescencyjnej z całkowitym odbiciem wiązki padającej (TXRF) [11].

W spektrometrze tym promieniowanie wzbudzające wytwarzane jest w lampie rentgenowskiej z anodą molibdenową (Mo), o mocy 30 W. Maksymalne napięcie lampy to 50 kV, a maksymalne natężenie 600 μA . Lampa chłodzona jest powietrzem. Promieniowanie pierwotne po odbiciu od monochromatora (monochromatyzacja promieniowania) pada pod bardzo małym kątem (zjawisko całkowitego odbicia promieniowania rentgenowskiego) na kwarcową podkładkę, na której umieszczona jest analizowana próbka. Wzbudzone w próbce promieniowanie charakterystyczne rejestrowane jest w detektorze SDD (XFlash) umieszczonym w pobliżu próbki. W metodzie TXRF analizowane są próbki ciekłe, a analizie podlega sucha pozostałość, która zostaje po zdeponowaniu ciekłej próbki na podkładkę kwarcową i jej wysuszeniu (Rys. 8). Pomiary przeprowadzane są w powietrzu. W spektrometrze PICOFOX możliwa jest detekcja promieniowania charakterystycznego pierwiastków od aluminium (Al) do uranu (U) (z powodów technicznych za wyjątkiem pierwiastków z zakresu od Zr do Ru). Oprogramowanie spektrometru (SPECTRA 7) umożliwia zarówno analizę jakościową jak i ilościową rejestrowanych widm promieniowania fluorescencyj-

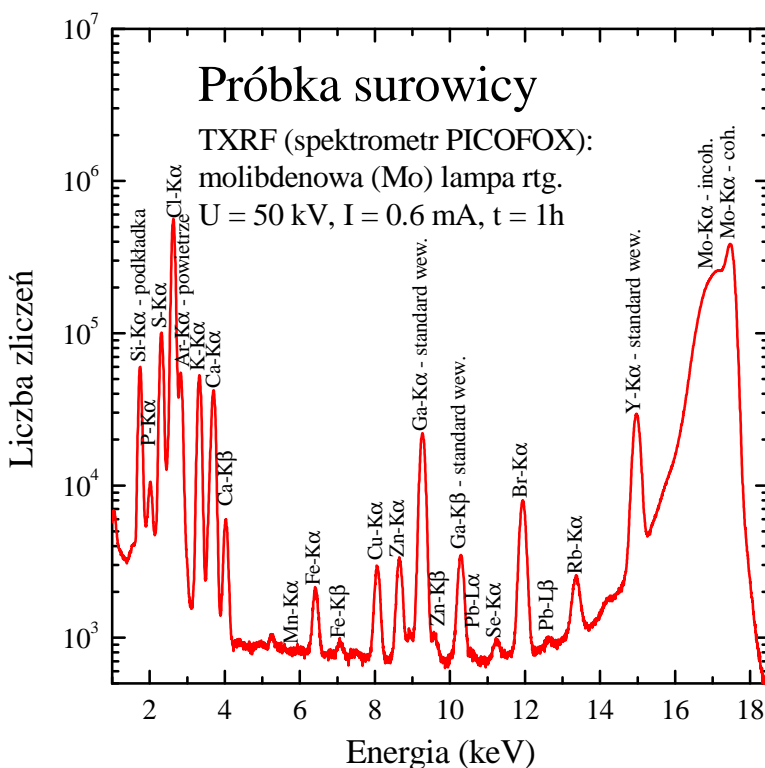
nego. Granica wykrywalności układu, zależna od rodzaju badanej próbki, analizowanego pierwiastka, jego koncentracji oraz czasu pomiaru, jest na poziomie kilku ng/g (ppb).

Typowym zastosowaniem metody TXRF jest analiza składu pierwiastkowego próbek środowiskowych i przemysłowych (woda, ścieki, roztwory przemysłowe, gleby), próbek ludzkiego materiału biologicznego (krew, surowica, mocz), czy też próbek biologicznych (materiał roślinny i zwierzęcy). Przygotowanie próbek ciekłych do pomiaru wymaga dodania standardu wewnętrznego (pierwiastek nieobecny w próbce, którego dodanie umożliwia dokonanie analizy ilościowej). Pierwiastki stosowane zazwyczaj jako standardy wewnętrzne to: gal (Ga), kobalt (Co), selen (Se) i itr (Y). Próbki stałe sprowadza się do postaci ciekłej przez ich rozpuszczenie w wodzie (lub mineralizację w kwasie). Próbka również wymaga dodania standardu wewnętrznego. Przykładowa preparatyka dla próbek surowicy to: 750 μ l surowicy + 50 μ l Ga (100 μ g/g). Przygotowany roztwór nanosi się w ilości 2-10 μ l na podkładki kwarcowe, suszy w podczernieniu i analizuje przy wykorzystaniu spektrometru PICOFOX. Czas pomiaru zależy od rodzaju analizowanej próbki i poziomu koncentracji oznaczanych pierwiastków. Typowe czasy pomiaru to 15-60 minut.



Rys. 8: Podkładka kwarcowa ze zdeponowaną centralnie próbką przygotowaną do analizy składu pierwiastkowego metodą rentgenowskiej analizy fluorescencyjnej z całkowitym odbiciem wiązki padającej (TXRF) – spektrometr PICOFOX.

Wynikiem analizy metodą TXRF jest rejestracja widma promieniowania charakterystycznego emitowanego przez atomy badanej próbki. Przykładowe widmo zarejestrowane metodą TXRF dla próbki surowicy ludzkiej przedstawione jest na Rys. 9. Zakres energetyczny widma obejmuje energię od 1.5 keV do 18 keV. Identyfikacji linii dokonuje się wykorzystując oprogramowanie spektrometru. W prezentowanym widmie zidentyfikowano linie następujących pierwiastków: P, S, Cl, K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn, Pb, Se, Br oraz Rb. Linia Si pochodzi z podkładki kwarcowej, linia Ar z atomów powietrza, Ga oraz Y są standardami wewnętrznymi, linie Mo pochodzą od promieniowania pierwotnego.



Rys. 9: Przykładowe widmo promieniowania charakterystycznego emitowanego przez próbkę surowicy ludzkiej w zakresie energii od 1.5 keV do 18 keV, ze zidentyfikowanymi liniami następujących pierwiastków: P, S, Cl, K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn, Pb, Se, Br oraz Rb.

Analiza ilościowa polega na przypisaniu wszystkim zaobserwowanym w widmie liniom odpowiadających im pierwiastków, podaniu koncentracji standardu wewnętrznego i wyznaczeniu pola powierzchni pików promieniowania charakterystycznego. Wynikiem jest raport, w którym podane są koncentracje pierwiastków określonych w próbce oraz niepewności pomiarowe, których źródłem jest niepewność wyznaczenia pola powierzchni linii promieniowania charakterystycznego. Wyznaczone wartości koncentracji dla przykładowego widma surowicy (Rys. 9) przedstawione są w Tabeli 1. Tabela przedstawia również całkowite niepewności pomiarowe koncentracji poszczególnych pierwiastków.

Tabela 1: Koncentracja pierwiastków w surowicy ludzkiej określone przy zastosowaniu metody TXRF. W tabeli podano również całkowite niepewności pomiarowe.

Pierwiastek	Surowica koncentracja ($\mu\text{g/g}$)
P	123.0 ± 7.4
S	804 ± 45
Cl	3765 ± 207
K	143.0 ± 7.8
Ca	82.6 ± 4.6
Mn	0.037 ± 0.010
Fe	0.765 ± 0.049
Cu	0.813 ± 0.050
Zn	0.785 ± 0.048
Se	0.042 ± 0.005
Br	1.77 ± 0.10
Rb	0.190 ± 0.014
Pb	0.040 ± 0.006

2.2 Doświadczenia fizyki jądrowej

W ramach doświadczeń z zakresu fizyki jądrowej wykorzystano istniejące stanowiska doświadczalne dedykowane studentom fizyki w trakcie zajęć na Pracowni Jądrowej. Wykorzystano następujące doświadczenia:

- 1) badanie zależności natężenia promieniowania γ od odległości źródła od detektora,
- 2) pomiar skażeń promieniotwórczych wody,
- 3) wyznaczanie krzywej absorpcji promieniowania γ ,
- 4) wyznaczanie czasu martwego licznika Geigera-Müllera metodą dwu źródeł,
- 5) aktywacja neutronowa; wyznaczanie krzywej zaniku aktywności, krzywej aktywacji i półokresu rozpadu izotopów promieniotwórczych.

Doświadczenia te są typowymi doświadczeniami fizyki jądrowej jednakże dla szkół wyjątkowo interesujące ze względu na brak możliwości wykonania tych doświadczeń w szkole (ograniczony dostęp do źródeł promieniotwórczych, detektorów promieniowania jądrowego, aspekt bezpieczeństwa). Do każdego stanowiska doświadczalnego przygotowane były również instrukcje doświadczalne, a zajęcia odbywały się pod nadzorem inspektora ochrony radiologicznej.

3. Podstawy teoretyczne metod eksperymentalnych i doświadczalnych fizyki atomowej i jądrowej w odniesieniu do podstawy programowej przedmiotu Fizyka oraz Przyroda

Metody TXRF oraz WDXRF mogą być z powodzeniem wykorzystane w edukacji szkolnej. Zagadnienia teoretyczne podstaw fizycznych tych metod, obejmujące przede wszystkim zjawiska fizyki atomowej, mogą być bez problemu wskazane jako treści nauczania wymienione w podstawie programowej przedmiotu FIZYKA (IV etap edukacyjny: liceum) [1]:

- w zakresie podstawowym (fizyka atomowa):

Uczeń:

- 1) opisuje promieniowanie ciał, rozróżnia widma ciągłe i liniowe rozrzedzonych gazów jednoatomowych, w tym wodoru,
 - 2) interpretuje linie widmowe jako przejścia między poziomami energetycznymi atomów,
 - 3) opisuje budowę atomu wodoru, stan podstawowy i stany wzbudzone,
 - 4) wyjaśnia pojęcie fotonu i jego energii,
 - 5) interpretuje zasadę zachowania energii przy przejściach elektronu między poziomami energetycznymi w atomie z udziałem fotonu,
 - 6) opisuje efekt fotoelektryczny, wykorzystuje zasadę zachowania energii do wyznaczenia energii i prędkości fotoelektronów,
- w zakresie rozszerzonym (fizyka atomowa i kwanty promieniowania elektromagnetycznego):

Uczeń:

- 1) opisuje założenia kwantowego modelu światła,
- 2) stosuje zależność między energią fotonu a częstotliwością i długością fali do opisu zjawiska fotoelektrycznego zewnętrznego, wyjaśnia zasadę działania fotokomórki,
- 3) stosuje zasadę zachowania energii do wyznaczenia częstotliwości promieniowania emitowanego i absorbowanego przez atomy,
- 4) opisuje mechanizmy powstawania promieniowania rentgenowskiego,
- 5) określa długość fali de Broglie'a poruszających się cząstek.

Również w przypadku doświadczeń z zakresu fizyki jądrowej podstawy teoretyczne dyskutowanych zjawisk mogą być wymienione jako treści nauczania wymieniane w podstawie programowej przedmiotu FIZYKA (IV etap edukacyjny: liceum) w zakresie podstawowym [1]:

Uczeń:

- 1) posługuje się pojęciami pierwiastek, jądro atomowe, izotop, proton, neutron, elektron; podaje skład jądra atomowego na podstawie liczby masowej i atomowej,

- 2) wymienia właściwości promieniowania jądrowego α , β , γ ; opisuje rozpad alfa, beta, sposób powstawania promieniowania gamma; posługuje się pojęciem jądra stabilnego i niestabilnego,
- 3) opisuje rozpad izotopu promieniotwórczego, posługując się pojęciem czasu połowicznego rozpadu; rysuje wykres zależności liczby jąder, które uległy rozpadowi od czasu,
- 4) opisuje reakcje jądrowe, stosując zasadę zachowania liczby nukleonów i zasadę zachowania ładunku oraz zasadę zachowania energii,
- 5) opisuje wybrany sposób wykrywania promieniowania jonizującego,
- 6) wyjaśnia wpływ promieniowania jądrowego na materię oraz na organizmy,
- 7) podaje przykłady zastosowania zjawiska promieniotwórczości i energii jądrowej.

Uzupełnieniem może być cytat z komentarza do podstawy programowej: „Podstawa przewiduje sporą liczbę godzin na zagadnienia fizyki jądrowej. Ten dział fizyki współczesnej ma jasne odniesienia do realnej rzeczywistości (elektronnie jądrowe, broń jądrowa, zastosowania medyczne i inne) i daje się ciekawie przedstawić bez skomplikowanego aparatu matematycznego. Dlatego warto mu poświęcić uwagę i nauczać nawet na poziomie podstawowym. Również w ostatnim etapie nauczania na poziomie rozszerzonym (druga i trzecia klasa liceum) zagadnieniom fizyki współczesnej nie poświęcono dużo uwagi. Nie oznacza to, że nie warto poświęcić im czasu. Jeśli nauczyciel go znajdzie, a uczniowie będą zainteresowani, to oczywiście nic nie stoi na przeszkodzie, żeby rozszerzyć zakres lekcji o te zagadnienia. Jednak ze względu na duże trudności w jasnym i prostym przedstawieniu najnowszych odkryć nie należy oczekiwać egzaminowania z nich uczniów na maturze” [1].

W odniesieniu do Podstawy programowej przedmiotu PRZYRODA (IV etap edukacyjny: liceum (przedmiot uzupełniający)) [1] wśród różnorodnych proponowanych wątków tematycznych również można przytoczyć przykłady takich bloków tematycznych, których prowadzenie można oprzeć, częściowo lub nawet w całości, o prezentowane metody eksperymentalne fizyki atomowej i jądrowej. Dla przykładu mogłyby to być następujące tematy:

- Metoda naukowa i wyjaśnianie świata.
- Historia myśli naukowej.
- Nauka w komputerze.
- Polscy badacze i ich odkrycia.
- Wynalazki, które zmieniły świat.
- Współczesna diagnostyka i medycyna.
- Nauka i sztuka.
- Woda – cud natury.
- Największe i najmniejsze.

Z komentarza do podstawy programowej przedmiotu Przyroda w liceum można dodatkowo przytoczyć następujący fragment [1]: „Różnorodność wątków tematycznych, ich interdyscyplinarność i aktualność naukowa powinny umożliwić uczniom skonsolidowanie wiedzy z różnych dziedzin, poznanie metody naukowej wykorzystywanej w naukach przyrodniczych oraz pomóc w świadomym odbieraniu otaczającej nas rzeczywistości i prawidłowym interpretowaniu zjawisk przyrodniczych. Jednocześnie daje okazję rozwijania indywidualnych zainteresowań uczniów, uwrażliwiania ich na piękno świata, kształtowania poczucia odpowiedzialności za jego przyszłość. Szeroki wachlarz tematyczny umożliwia odnalezienie wśród zaproponowanych tematów takich, które daną grupę uczniów szczególnie interesują. Zainteresowanie uczniów oraz fakt, że mają realny wpływ na to, czego będą się uczyli, sprzyja ich większemu zaangażowaniu w proces uczenia się. To z kolei zwiększa szanse na osiągnięcie przez uczniów, nawet słabych, sukcesu edukacyjnego.

Wydaje się, że szczególnie korzystną metodą pracy jest metoda projektów uczniowskich. Przy ich realizacji ścisła współpraca nauczycieli przedmiotów przyrodniczych może ułatwić poznawanie przez młodych ludzi wybranych do realizacji zagadnień oraz poszerzyć ich horyzonty”.

4. Projekty edukacyjne, w których realizacji wykorzystano metody eksperymentalne dostępne w Instytucie Fizyki UJK

Układy eksperymentalne metod TXRF oraz WDXRF, a także doświadczenia z fizyki jądrowej, wykorzystywane były na potrzeby edukacji szkolnej uczniów szkół podstawowych, gimnazjalnych oraz ponadgimnazjalnych, przy czym treści kształcenia realizowane przy wykorzystaniu tych metod odnoszą się właściwie tylko do szkół ponadgimnazjalnych. W przypadku szkół podstawowych zajęcia miały charakter krótkich pogadanek, natomiast na poziomie gimnazjum sposób prezentacji i wykorzystania tych metod dopasowywany był do możliwości uczniów (np. praca z grupą uczniów zdolnych). Działania edukacyjne z wykorzystaniem wymienionych metod miały zarówno charakter sformalizowanych projektów edukacyjnych, jak i okazjonalnych wizyt szkół w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Jana Kochanowskiego w Kielcach.

Przykłady projektów edukacyjnych, w których wykorzystano metody TXRF, WDXRF oraz doświadczenia na pracowni jądrowej:

- trzyletni program edukacyjny *FENIKS*, realizowany w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki Europejskiego Funduszu Społecznego przez konsorcjum Uniwersytetu Jagiellońskiego, Uniwersytetu Rzeszowskiego i UJK; rekrutacja objęła gimnazja i szkoły ponadgimnazjalne; w ramach pakietu „Fizyka w służbie człowieka” uczniowie wykonywali doświadczenia z fizyki jądrowej,

- projekt *systemowy Świątokrzyski System Wspierania Talentów – Fascynujący Świat Nauki* realizowanym w ramach Priorytetu IX Rozwój wykształcenia i kompetencji w regionach, Działania 9.1 Wyrównywanie szans edukacyjnych i zapewnienie wysokiej jakości usług edukacyjnych świadczonych w systemie oświaty, Poddziałania 9.1.2 Wyrównywanie szans edukacyjnych uczniów z grup o utrudnionym dostępie do edukacji oraz zmniejszanie różnic w jakości usług edukacyjnych Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki, organizatorem jest Świątokrzyskie Centrum Doskonalenia Nauczycieli w Kielcach oraz Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach; rekrutacja objęła uczniów i nauczycieli szkół podstawowych i gimnazjów; w ramach zajęć warsztatowych gimnazjaliści pracowali wokół projektu „Czy wiemy co pijemy” – analiza składu pierwiastkowego wody metodą TXRF,
- *Ogólnopolski Program Badawczy e-kologia nuklearna* realizowany w Katedrze Modelowania Procesów Nauczania, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Łódzki, pod kierownictwem prof. dr hab. Tadeusza Wibiga; część materiału do pracy doktorskiej Punsiri Dam-O; w ramach projektu analiza metodą TXRF składu pierwiastkowego traw zbieranych przez uczniów w różnych częściach Polski, Rosji, Tajlandii [12],
- eksperyment pedagogiczny „*Praktyczne wykorzystanie fizyki współczesnej w życiu człowieka*”, wzbogacający istniejący system oświatowy o nowe rozwiązania służące podnoszeniu skuteczności kształcenia w zakresie fizyki i astronomii, przygotowany do realizacji w roku szkolnym 2013/14 w wymiarze 2 godzin tygodniowo i w każdym kolejnym roku szkolnym w klasach pierwszych, które będą realizować w kolejnych klasach fizykę i astronomię w zakresie rozszerzonym, pod kierunkiem mgr Joanny Nowickiej, Liceum Ogólnokształcące im. ks. kard. Stefana Wyszyńskiego w Staszowie; w ramach projektu uczniowie wykonywali zajęcia na pracowni jądrowej, oraz analizowali metodą WDXRF skład pierwiastkowy gleby z terenu szkoły, a także skład pierwiastkowy wody metodą TXRF,
- matura międzynarodowa, przedmioty eksperymentalne: Fizyka, VI Liceum Ogólnokształcące im. Juliusza Słowackiego w Kielcach; samodzielnie przeprowadzone przez uczniów eksperymenty z zakresu fizyki jądrowej,
- wizyty klas szkół podstawowych, gimnazjalnych i ponadgimnazjalnych; zwiedzanie laboratoriów, doświadczenia na pracowni jądrowej.

W zależności od projektu edukacyjnego zajęcia w czasie, których wykorzystywano metody eksperymentalne fizyki atomowej i jądrowej dopasowywano do możliwości poznawczych grupy uczniów. Uczniowie zapoznawani byli z podstawami fizycznymi technik eksperymentalnych (pogadanka, seminarium naukowe, wykład specjalistyczny), otrzymywali instrukcje wykonania doświadczeń, z którymi niejednokrotnie mogli zapoznać się w szkole przed przyjazdem na uczelnię. Uczniowie samodzielnie wykonywali doświadczenia w oparciu o

przygotowane instrukcje, bądź też oglądali przykładową demonstrację wykorzystania diskutowanych metod.

5. Wnioski

Współczesne metody eksperymentalne fizyki atomowej i jądrowej mogą być z sukcesem wykorzystane w edukacji szkolnej. Przykładem jest metoda rentgenowskiej analizy fluorescencyjnej z dyspersją długości fali (WDXRF) oraz rentgenowska analiza fluorescencyjna z całkowitym odbiciem wiązki padającej (TXRF), wykorzystywane w Instytucie Fizyki UJK w działalności naukowo-dydaktycznej do analizy składu pierwiastkowego różnorodnych próbek, a także doświadczenia dedykowane fizyce jądrowej. Podstawy fizyczne prezentowanych metod eksperymentalnych mogą być wprowadzone w łatwy i przystępny sposób w zależności od docelowej grupy uczniów, w ścisłym odniesieniu do podstawy programowej zarówno fizyki (fizyka atomowa i jądrowa) jak i przyrody w liceum. Zajęcia edukacyjne mogą być przygotowane jako krótkie 1-2 godzinne ćwiczenia praktyczne najlepiej poprzedzone wykładem wprowadzającym. Dodatkowym atutem diskutowanych metod jest ich interdyscyplinarne wykorzystanie w badaniach z zakresu fizyki, biologii, geografii, ochrony środowiska i wielu innych.

Literatura

- [1] Podstawa programowa z komentarzami, tom 5, *Edukacja przyrodnicza w szkole podstawowej, gimnazjum i liceum, przyroda, geografia, biologia, chemia i fizyka*, Wydawnictwo MEN, 2009.
- [2] *Słownik fizyczny*, Wiedza Powszechna, Warszawa, 1984.
- [3] A. Oleś, *Metody doświadczalne fizyki ciała stałego*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1998.
- [4] A. Kubala Kukuś, *Zastosowanie rentgenowskiej analizy fluorescencyjnej w badaniu rozkładów koncentracji pierwiastków śladowych w materiałach biomedycznych* – praca doktorska.
- [5] R. Van Grieken, A. Markowicz, *Handbook of X-ray Spectrometry*, Marcel Dekker, New York, 1993.
- [6] J. P. Willis, A. R. Duncan, *Understanding XRF Spectrometry*, PANalytical B.V., Almelo, 2008.
- [7] R. Klockenkämper, *Total Reflection X-Ray Fluorescence Analysis*. Wiley, New York, 1997.
- [8] V. K. Pecharsky, P. Y. Zavalij, *Fundamentals of Powder Diffraction and Structural Characterization of Materials*, Springer, New York, 2009.
- [9] Materiały informacyjne PANalytical (<http://www.panalytical.com>).
- [10] Axios, *SuperQ5 Reference Manual*, PANalytical B.V., Almelo, 2005.
- [11] Materiały informacyjne Bruker (<http://www.bruker.com>).
- [12] <https://sites.google.com/site/nuclearremotelaboratorypl/>