



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Człowiek – najlepsza inwestycja

FENIKS

Wykłady z pokazami, UJK, cz. VI b

Fizyka współczesna: kwanty i materia

Marek Pajek

Institut Fyzyki

*Uniwersytet Jana Kochanowskiego
w Kielcach*

(pisemna wersja wykładu plenarnego z pokazami z VI semestru zajęć)

Film z wykładu: www.feniks.ujk.edu.pl/index.php/pol/Multimedia/Filmy/UJK



- długofalowy program odbudowy, popularyzacji i wspomagania fizyki w szkołach w celu rozwijania podstawowych kompetencji naukowo - technicznych, matematycznych i informatycznych uczniów

Projekt współfinansowany jest ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Część B

Promieniotwórczość

Materia jest zbudowana z obojętnych elektrycznie atomów, które z kolei są zbudowane z cząstek naładowanych elektrycznie: ujemnych elektronów i dodatnich protonów (w liczbie równej liczbie elektronów), oraz obojętnych ładunkowo neutronów. Protony i neutrony skupiają się w **jądram atomowych**. Jądra atomowe, które są około 100 000 razy mniejsze niż rozmiary atomów (a więc mają rozmiar rzędu 10^{-15} m) i zawierają prawie całą masę atomów. Wynika to z faktu, że masa elektronu jest blisko 2000 razy mniejsza od masy protonu lub, niemal jej równej masy neutronu. Na dzisiejszym wykładzie dużo dowiedzieliśmy się o promieniowaniu atomów. Ale czy jądra atomowe też promieniają? Okazuje się że tak, co zostało odkryte w końcu XIX wieku. Stwierdzono wtedy, że niektóre jądra atomowe emitują cząstki dodatnio naładowane, które okazały się być jądrami helu (dwa protony i dwa neutrony), stając się w wyniku tej emisji (rozpadu) jądrami innych atomów. To nieznanne dotychczas zjawisko nazwano **promieniotwórczością**, a opisany rodzaj promieniowania – **promieniowaniem α** . Szybko okazało się, że jądra atomowe mogą emitować również ujemnie naładowane elektrony lub ich **antycząstki – dodatnio naładowane pozytony**. Te rodzaje promieniowania nazwano odpowiednio **β^- i β^+** . Zauważono również, że rozpadom promieniotwórczym α lub β towarzyszy trzeci rodzaj promieniowania, polegający na emisji kwantów promieniowania elektromagnetycznego o bardzo wysokiej energii, czyli elektrycznie obojętnych fotonów. Ten rodzaj promieniowania nazwano **promieniowaniem γ** . Kwanty promieniowania α , β lub γ mają typowo energię milionów **elektronowoltów (MeV)**, a więc milion razy większą niż energia fotonów promieniowania widzialnego, będąca zazwyczaj równa kilku elektronowoltom (eV). Warto tutaj zaznaczyć, że elektronowolt (eV), ulubiona jednostka energii fizyków, to energia, jaką nabywa elektron przyspieszany napięciem jednego wolta (V). Jak więc widzimy, promieniotwórczość α , β , lub γ polega na emisji przez jądra atomowe bardzo małych cząstek o bardzo dużych energiach. Jak możemy takie promieniowanie obserwować?

Jak mierzymy promieniowanie jądrowe?

Do obserwacji promieniowania jądrowego α , β , lub γ służą specjalne przyrządy, zwane detektorami promieniowania. Najprostszym takim detektorem jest **licznik Geigera-Müllera**, umożliwiający jedynie rejestrację faktu wpadnięcia cząstki promieniowania jądrowego do detektora, a więc zliczanie. Jak działa licznik Geigera-Müllera wykorzystywany w pokazach na wykładzie? Jest to cienka, wypełniona rozrzedzonym gazem, rurka metalowa z rozciągniętym wzdłuż jej osi cienkim drucikiem. Między drucik i rurkę przyłożone jest wysokie

napięcie (około 1000 V), powodujące powstanie w rurce silnego pola elektrycznego. Gdy kwant promieniowania α , β , lub γ wpadnie do licznika, to zderzając się z cząsteczkami gazu powoduje ich **jonizację**, tj. rozpad na ujemne elektrony i dodatnio naładowany jony, które następnie przyciągane są do przeciwnie naładowanych elektrod (drucik i ścianka rurki). Zwielokrotnione poprzez kolejne zderzenia z cząsteczkami gazu elektrony i jony po dotarciu do odpowiednich elektrod wytwarzają impuls elektryczny na tyle silny, że możemy już go zarejestrować. W najprostszym liczniku Geigera-Müllera, pokazywanym na wykładzie, takie sygnały elektryczne są zamieniane na sygnały dźwiękowe, charakterystyczne „trzaski”, informujące nas o zarejestrowaniu kwantu promieniowania α , β , lub γ . Zachowując przez chwilę ciszę, słyszymy przypadkowe „trzaski” naszego licznika.

Ale co nasz licznik zlicza w tej chwili? Otóż rejestruje tzw. **promieniowanie tła, pochodzące od promieniowania kosmicznego**, które ciągle bombarduje naszą Ziemię. Promieniowanie kosmiczne to strumień cząstek o bardzo wielkich energiach, rzędu 10^{20} eV, docierający do nas z kosmosu. Oddziałując z atmosferą otaczającą Ziemię produkuje wtórne **lawiny cząstek i fotonów** o bardzo wysokich energiach. Właśnie te cząstki „słyszymy” przy pomocy naszego licznika Geigera-Müllera. Aby się upewnić, że licznik naprawdę rejestruje promieniowanie jądrowe, zbliżamy do niego „prawdziwe” źródło promieniotwórcze – laboratoryjne źródło promieniowania γ będące radioizotopem kobaltu ^{60}Co . Słyszymy wtedy gwałtowny wzrost częstotliwości „trzasków”, a w rzeczywistości liczby zarejestrowanych kwantów γ .

Wiemy już, jak działa licznik Geigera-Müllera, którego kilka typów będziemy wykorzystywać w dalszych pokazach. W kolejnym pokazie demonstrujemy licznik Geigera-Müllera połączony z przelicznikiem umożliwiającym zliczanie i zapamiętywanie liczby zarejestrowanych cząstek w zadanym czasie. Zobaczmy, ile kwantów promieniowania tła ten licznik zarejestruje w czasie 10 sekund. Okazuje się że licznik pokazuje typowo kilka zliczeń, a powtarzając to doświadczenie stwierdzamy, że zaobserwowana liczba zliczeń zmienia się od przypadku do przypadku. Nie jest to żaden błąd, a charakterystyczna własność rozpadów promieniotwórczych, zachodzących w przypadkowych momentach czasu i z małym prawdopodobieństwem. Przypomina to trochę losowanie w Totolotku! Wykorzystując kolejny **licznik Geigera-Müllera podłączony do komputera możemy na ekranie obserwować, jak liczba zarejestrowanych zliczeń zmienia się w czasie**. I znów widzimy zupełną przypadkowość liczby zliczeń, co nazywamy w fizyce **fluktuacjami**. Tak więc zapamiętujemy że, liczba zliczeń rejestrowanego promieniowania jądrowego α , β , lub γ podlega silnym fluktuacjom, co jest charakterystyczną cechą promieniotwórczości.

Znając poziom tła promieniowania w sali wykładowej, możemy wykonać inne pomiary wykorzystując posiadane źródła promieniotwórcze. Umieszczając takie źródło w pewnej odległości od licznika, a następnie w odległości dwa razy większej, stwierdzamy że średnio (musimy pamiętać o fluktuacjach!) liczba zliczeń spada około czterokrotnie, co jest spodziewanym spadkiem jak $1/r^2$ dla **zależności intensywności promieniowania od odległości** r dla źródła punktowego.

Własności promieniowania α , β i γ

Gdy umiemy już mierzyć promieniowanie jądrowe popatrzmy jak promienie α , β , lub γ oddziałują z materią. W szczególności chcemy zbadać, jak się osłonić od promieniowania

jądrowego, które w dużych dawkach jest niebezpieczne. Ale pamiętajmy również, że promieniowanie α zawsze nam towarzyszy, co więcej, uważa się, że odegrało ono istotną rolę w ewolucji życia na Ziemi powodując niezbędne dla jej zchodzenia mutacje genetyczne. Zaczniemy od **badania własności promieniowania β^- emitowanego ze źródła ^{90}Sr** , czyli radioizotopu strontu emitującego elektrony o energiach około MeV, wstawiając między źródło i licznik Geigera-Müllera materiały o różnych grubościach. Wstawienie płytki pleksiglasu o grubości 1 mm niewiele zmniejsza intensywność rejestrowanego promieniowania, co oznacza, że promieniowanie β nie jest absorbowane w badanej płytce. Zastępując pleksiglas 10 mm płytką aluminiową obserwujemy znaczne zmniejszenie liczby zliczeń, ale promieniowanie β mimo wszystko przenika nawet przez tak grubą warstwę aluminium. Dopiero podwojenie grubości aluminium, a więc warstwa 20 mm, w pełni zatrzymuje badane promieniowanie β . Teraz już wiemy jak się osłonić przed promieniowaniem β .

Podobne **doświadczenie ze źródłem ^{60}Co emitującym promieniowanie γ** o energiach nieco ponad MeV pokazuje, że jest ono bardziej przenikliwe, niż promieniowanie β . Badanego promieniowania γ praktycznie nie zatrzymuje ani cienki pleksiglas ani 2 cm warstwa aluminium. Zostaje ono znacznie osłabione dopiero w warstwie ołowiu o grubości około 5 cm, a pełne zatrzymanie wiązki promieni γ następuje dopiero w warstwie ołowiu o grubości 10 cm! Tak grube osłony ołowiane trzeba stosować, aby się ochronić przed promieniowaniem γ o energii rzędu 1 MeV. W ten sposób pokazaliśmy, że najbardziej przenikliwe jest promieniowanie γ (kwanty promieniowania elektromagnetycznego), mniej przenikliwe promieniowanie β (lekkie cząstki naładowane: elektrony lub pozytony), a, jak pokażemy poniżej, najmniej przenikliwe jest promieniowanie α (ciężkie cząstki naładowane – jądra helu). Widzimy więc, że o zasięgu promieniowania w materii decydują w znacznym stopniu ładunek i masa cząstki. Ciężkie cząstki α mają najmniejszy zasięg w materii, do ich zatrzymania wystarcza warstwa powietrza o grubości pojedynczych centymetrów. Tak mały zasięg cząstek α sprawia, że musimy je mierzyć detektorami o bardzo cienkich okienkach (aby cząstki α dostawały się do wnętrza detektora), umieszczanymi w powietrzu bardzo blisko źródła lub wykonując pomiary w próżni.

Takim **detektorem promieniowania α wyposażonym w bardzo cienkie okienko możemy zademonstrować naturalną promieniotwórczość α** naszego stołu laboratoryjnego, pokrytego powłoką ceramiczną. Kładąc detektor na stole stwierdzamy, że rejestruje on znacznie większą liczbę zliczeń niż w przypadku oddalenia go od stołu (wtedy liczba zliczeń odpowiada stałemu poziomowi tła), bowiem cząstki α są absorbowane w powietrzu. Taki pomiar uzmysławia nam, że prawie wszystkie materiały naturalne zawierają bardzo małe domieszki izotopów promieniotwórczych i są bardzo słabymi źródłami promieniowania α , β , lub γ . Możemy to potwierdzić **zbliżając nasz detektor do rozsypanej soli potasowej**, która jest w dużych ilościach wysypywana zimą na drogi w celu roztopienia śniegu i lodu. Zawarte w soli potasowej KCl niewielkie ilości izotopu ^{40}K emitującego promieniowanie β i γ są przyczyną znacznego zwiększenia obserwowanej liczby zliczeń w naszym pokazie. Z tego i z poprzednich doświadczeń musimy zapamiętać, że promieniowanie jądrowe α , β lub γ zawsze nam towarzyszy, bądź jako promieniowanie kosmiczne, lub też jako promieniotwórczość naturalna materiałów nas otaczających, w tym w znacznym stopniu materiałów budowlanych opartych na naturalnych kopalinach.

Promieniowanie rentgenowskie

Ostatni pokaz prezentowany na wykładzie jest bardziej zaawansowany. Chcemy w nim pokazać, jak **wykorzystując izotop ameryku ^{241}Am jako źródło promieniowania α możemy wzbudzać i obserwować promieniowanie rentgenowskie**. Jeśli blisko takiego źródła umieścimy kawałek metalu, na przykład miedzi, to cząstki α o energii nieco ponad 5 MeV emitowanych z ^{241}Am padające na płytkę Cu powodują wybijanie elektronów z tzw. wewnętrznych powłok atomowych miedzi, w tym z najniższej powłoki oznaczanej jako K. Taki proces nazywamy jonizacją atomu w zderzeniu z cząstką naładowaną. Wzbudzone w ten sposób atomy miedzi, tzn. z dziurą (brakującym elektronem) w powłoce K, po pewnym bardzo krótkim czasie emitują kwant promieniowania rentgenowskiego w wyniku przejścia elektronu z wyższej powłoki L do powłoki K, tak, aby zapełnić dziurę w tej powłoce. Emitowane w tym procesie charakterystyczne promieniowanie rentgenowskie jest znanym nam promieniowaniem elektromagnetycznym atomów. Różni się tylko bardzo znacznie energią kwantów promieniowania. Dla dyskutowanych wcześniej przejść optycznych przejście elektronu następuje pomiędzy powłokami zewnętrznymi, a typowa energia fotonów w zakresie widzialnym jest rzędu eV. Dla przejść rentgenowskich pomiędzy najniższymi powłokami atomowymi, w naszym przypadku K i L, energia fotonów rentgenowskich, zwanych też **promieniowaniem X**, jest rzędu tysięcy elektronowoltów (keV). Wynika to z faktu, że elektrony w atomach są najsilniej związane w najniższych powłokach.

W jaki sposób mierzymy promieniowanie rentgenowskie? Do tego celu **zademonstrujemy działanie nowoczesnego półprzewodnikowego detektora dryftowego** firmy KETEK, który wykorzystujemy profesjonalnie w naszym laboratorium rentgenowskim. Taki detektor może precyzyjnie mierzyć energię fotonów rentgenowskich wykorzystując fakt, że foton zaabsorbowany w półprzewodniku krzemowym wytwarza znaczną liczbę par elektron-dziura, które są rejestrowane jako sygnał elektryczny. Ponieważ liczba wytworzonych par elektron-dziura jest proporcjonalna do energii fotonu, taki detektor mierzy energię zarejestrowanych kwantów. Detektor KETEK jest podłączony do komputera, gdzie zanalizowane sygnały elektryczne z detektora są pokazywane na monitorze w postaci widma energetycznego fotonów, tzn. zależności liczby zliczeń fotonów od energii w danym przedziale. Patrząc na ekran monitora widzimy, jak „rośnie” w czasie widmo rejestrowanych fotonów promieniowania rentgenowskiego wzbudzanego w miedzi. Składa się ono w istocie z **dwóch linii, tzw. $K\alpha$ i $K\beta$, charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego, odpowiadającego przejściom elektronów ze stanów powłoki L do powłoki K**. Nasze źródło ^{241}Am promieniowania α i wzbudzanego wtórnego promieniowania rentgenowskiego jest sprytnie zbudowane w taki sposób, że obracając pierścień z płytkami metalu pod źródłem ^{241}Am możemy wybrać dany metal z zestawu i wzbudzać promieniowanie rentgenowskie w Cu, As, Rb, Mo, Ba, Tb. Zmieniając metal widzimy, że emitowane promieniowanie rentgenowskie ma coraz to inne energie linii $K\alpha$ i $K\beta$, które są charakterystyczne (jak odciski palców) dla danego pierwiastka. Tak więc, odwracając problem, możemy powiedzieć, że mierząc charakterystyczne promieniowanie rentgenowskie w nieznanymi próbkach, możemy stwierdzić, z jakich pierwiastków się te próbki składają. W istocie jest to podstawa fizyczna rentgenowskiej analizy fluorescencyjnej, metody bardzo szeroko stosowanej w badaniach materiałów, w szczególności bardzo małych czy śladowych (10^{-9} g/g) domieszek w materiałach.

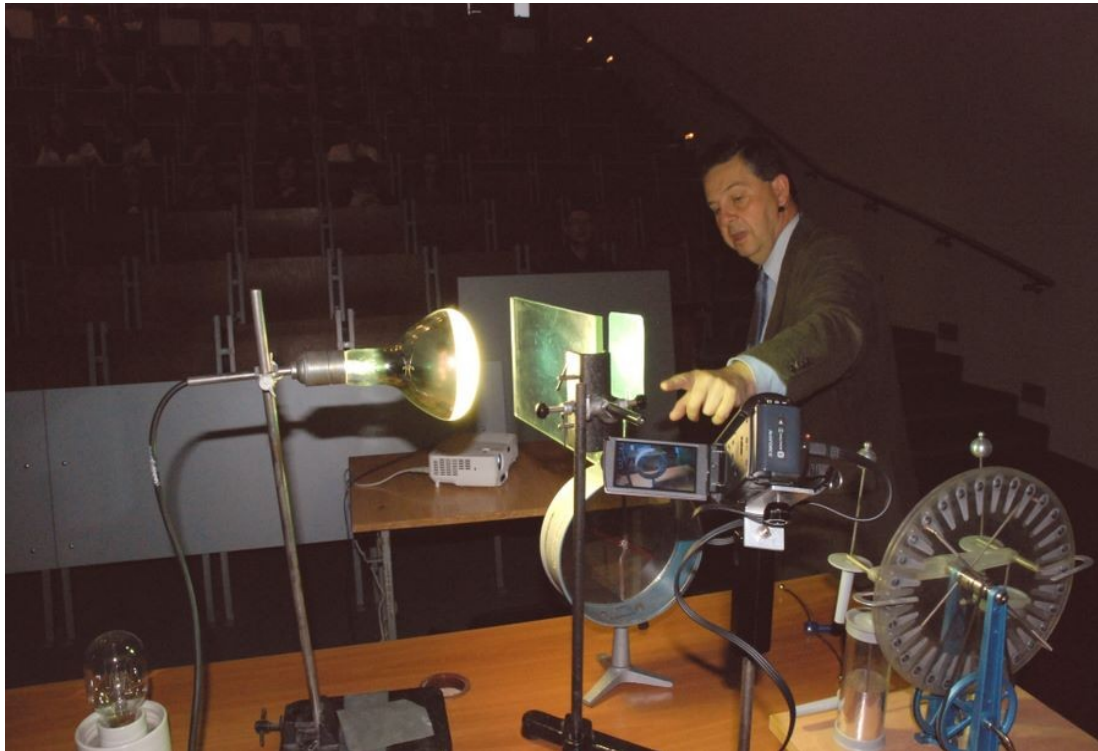
Obserwując charakterystyczne linie $K\alpha$ i $K\beta$ promieniowania rentgenowskiego pierwiastków przypominamy sobie demonstrowane wcześniej widma liniowe promieniowania widzialnego

atomów. Mimo, że technika obserwacji jest zupełnie inna, tak naprawdę widzimy to samo: dyskretne linie charakterystycznego promieniowania elektromagnetycznego atomów, które świadczą o skwantowanej (dyskretnej) naturze elektronowych poziomów energetycznych w atomie. Promieniowanie liniowe jest zatem obrazem kwantowej natury atomów. Tak więc kwantową naturę mikroświata można jednak zobaczyć !

Wykaz pokazów

Część B - promieniotwórczość

- 1) budowa i działanie licznika Geigera-Müllera
- 2) demonstracja poziomu tła promieniotwórczego w sali wykładowej
- 3) pokaz losowej natury rozpadów promieniotwórczych poprzez obserwację fluktuacji liczby zliczeń w czasie
- 4) badanie zależności liczby zliczeń od odległości źródła promieniotwórczego
- 5) badanie pochłaniania promieniowania β ze źródła ^{90}Sr w materiałach
- 6) badanie pochłaniania promieniowania γ ze źródła ^{60}Co w materiałach
- 7) pokaz promieniotwórczości naturalnej materiałów
- 8) wzbudzanie promieniowania rentgenowskiego promieniowaniem α emitowanym ze źródła ^{241}Am
- 9) detektor półprzewodnikowy promieniowania rentgenowskiego (KETEK)
- 10) demonstracja linii $K\alpha$ i $K\beta$ charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego



Efekt fotoelektryczny nie zachodzi gdy przed lampą kwarcową wstawimy szycę



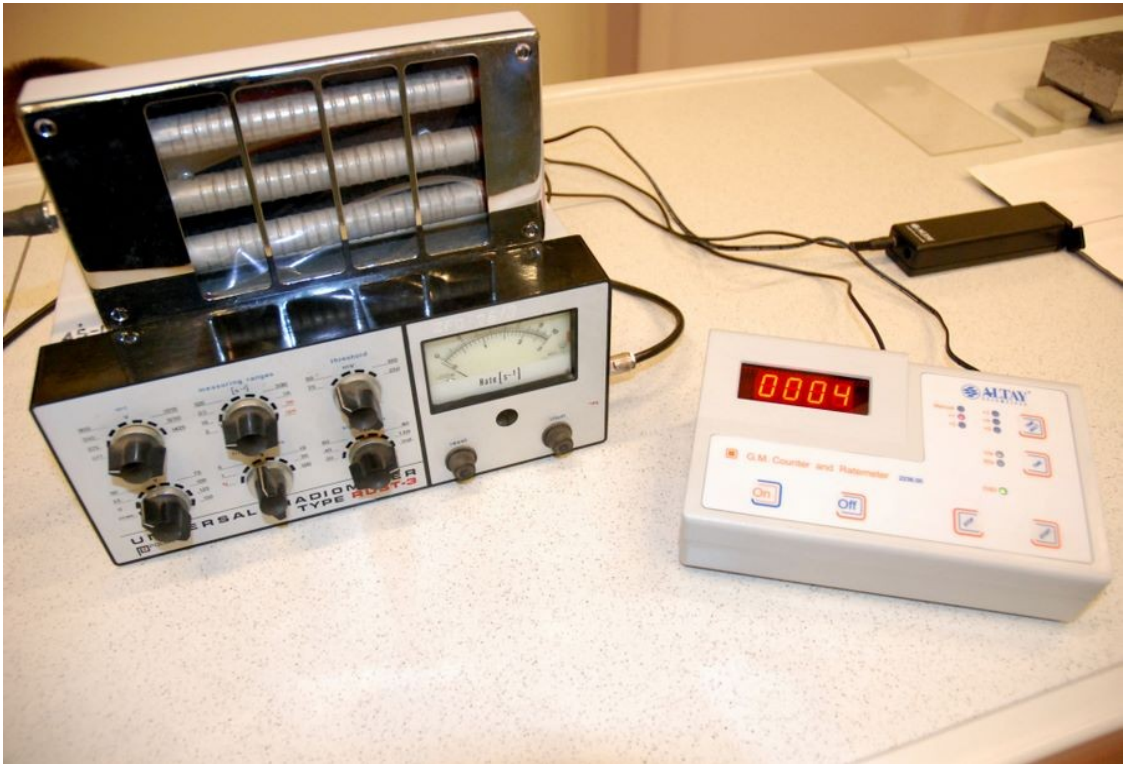
Po usunięciu szycy elektroskop się szybko rozładowuje w wyniku wybijania elektronów z płytki metalowej



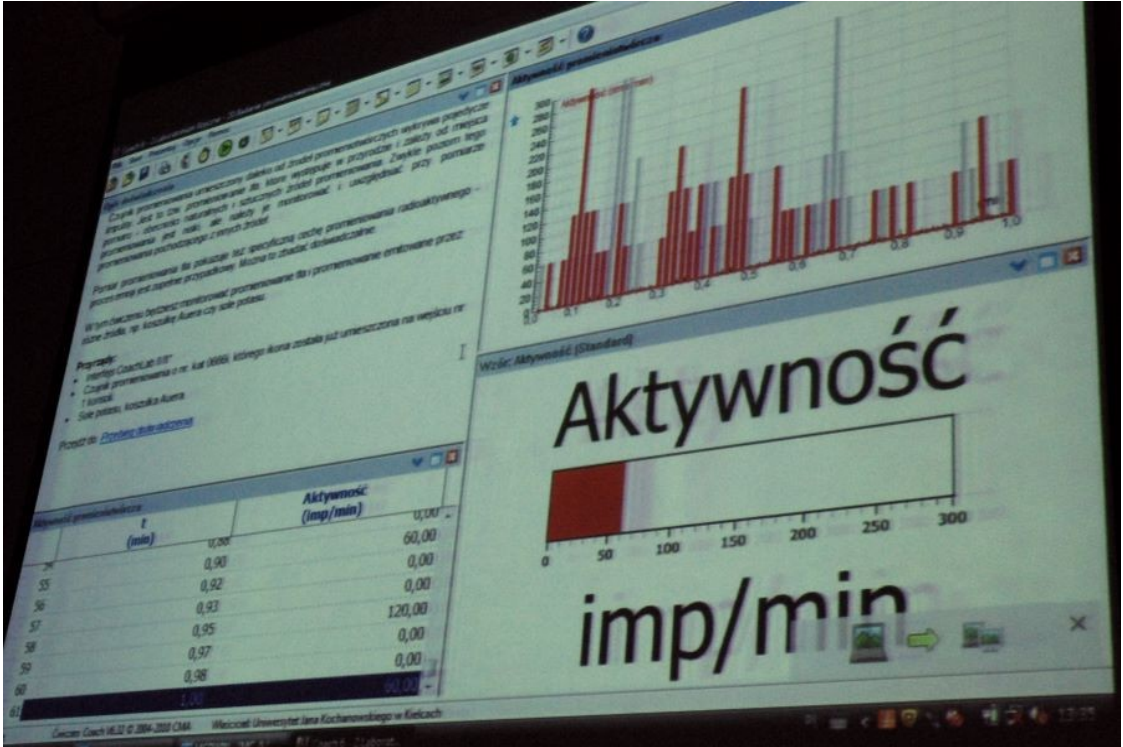
Kolorowe diody przekonują nas że fotony niebieskie mają najwyższą energię



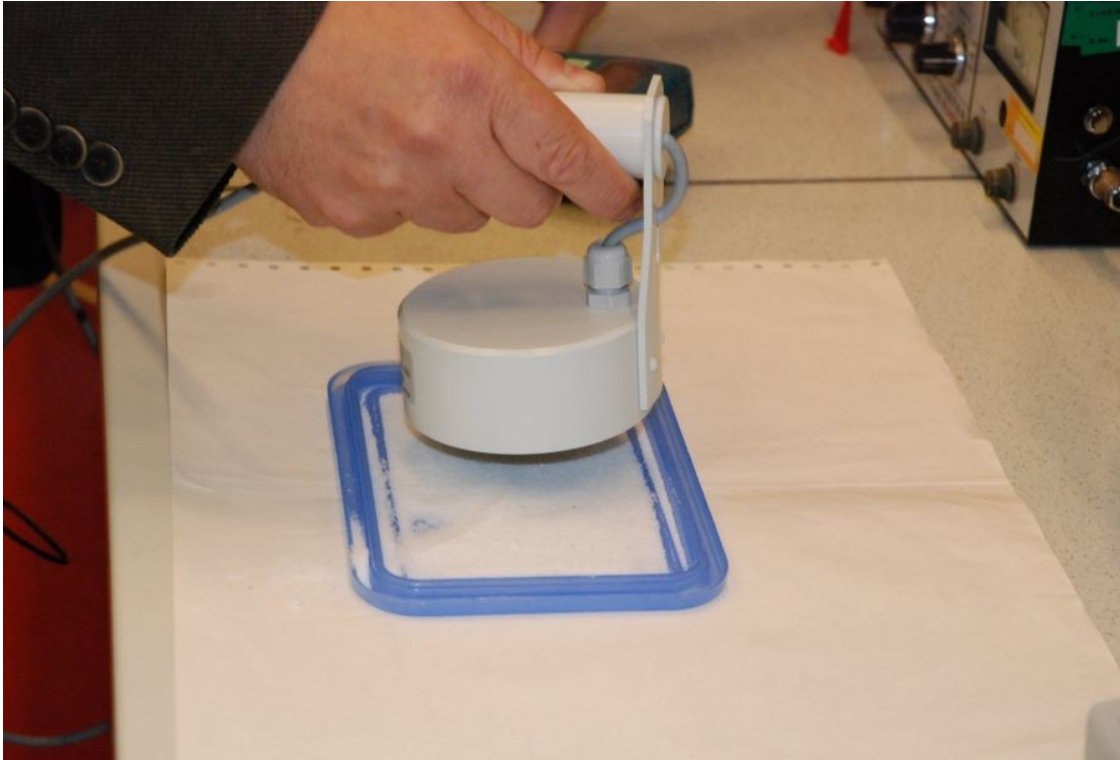
Materia jest zbudowana z atomów



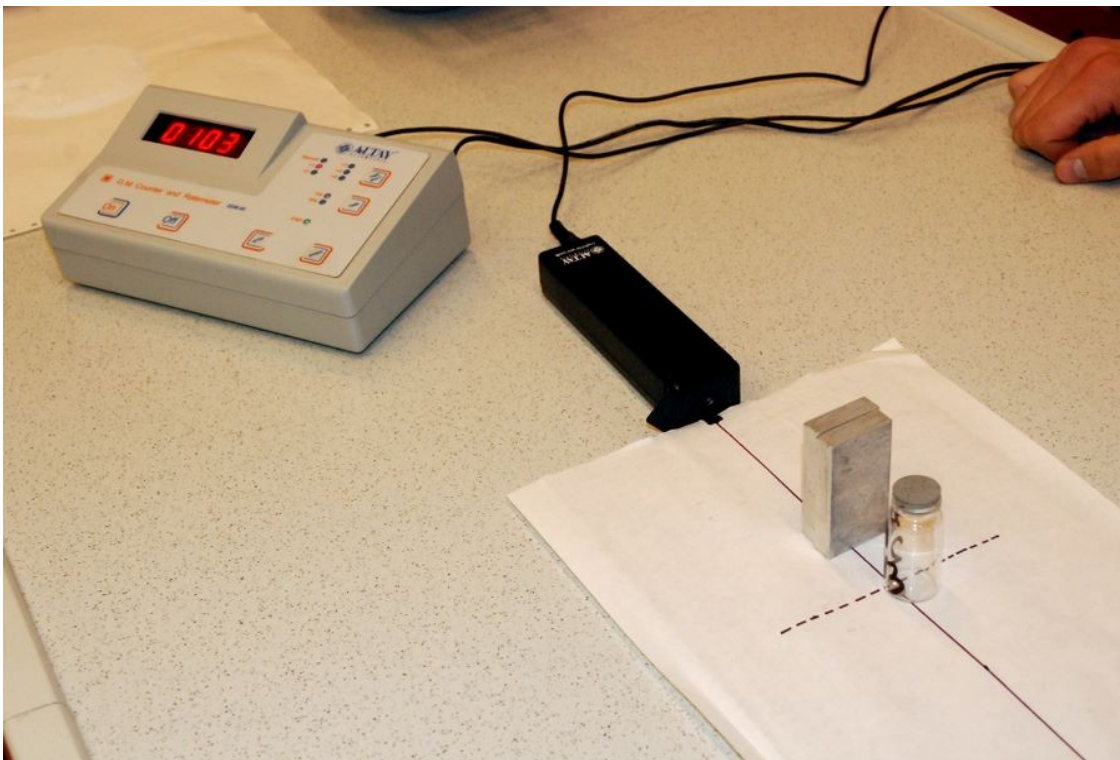
Liczniki Geigera-Müllera gotowe do pomiarów



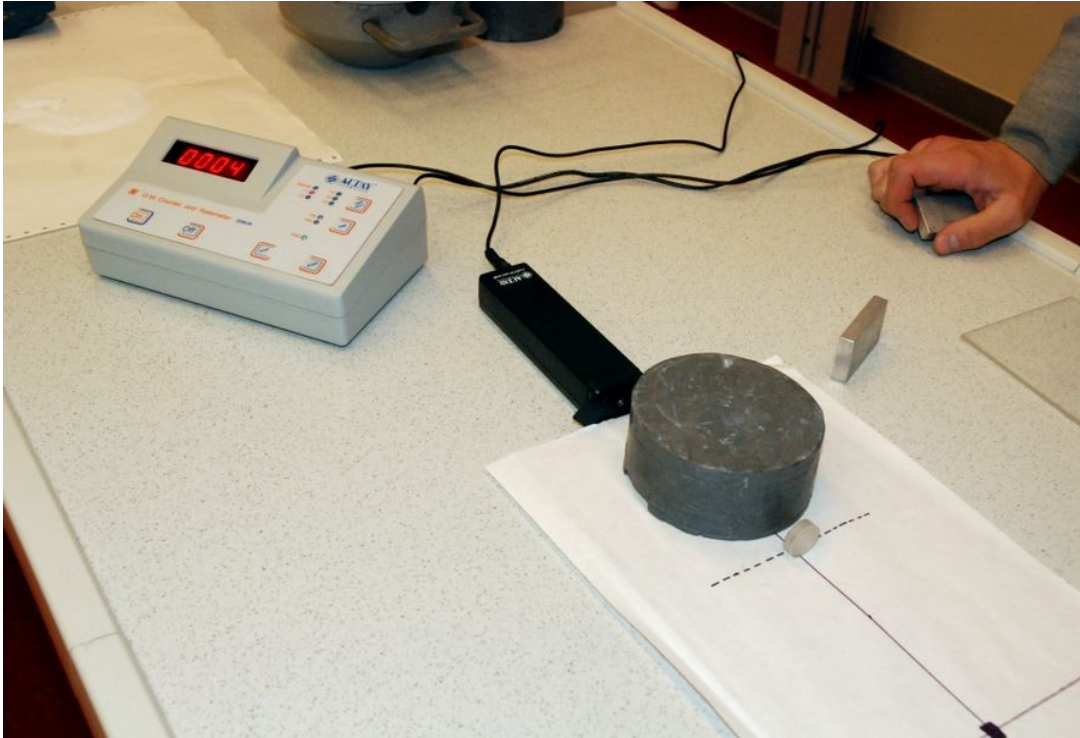
Demonstracja losowej natury rozpadów promieniotwórczych



Pomiar naturalnej promieniotwórczości soli potasowej



Promieniowanie γ przenika przez 2 cm warstwę aluminium



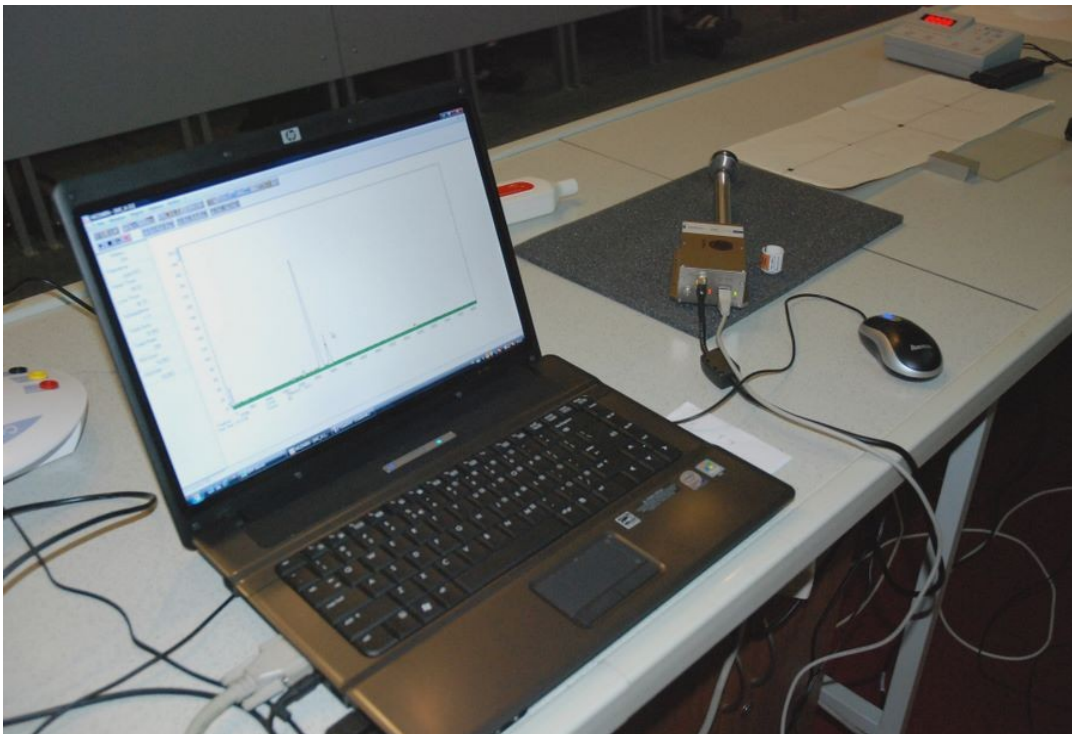
Warstwa 10 cm ołowiu zatrzymuje promieniowanie β i γ



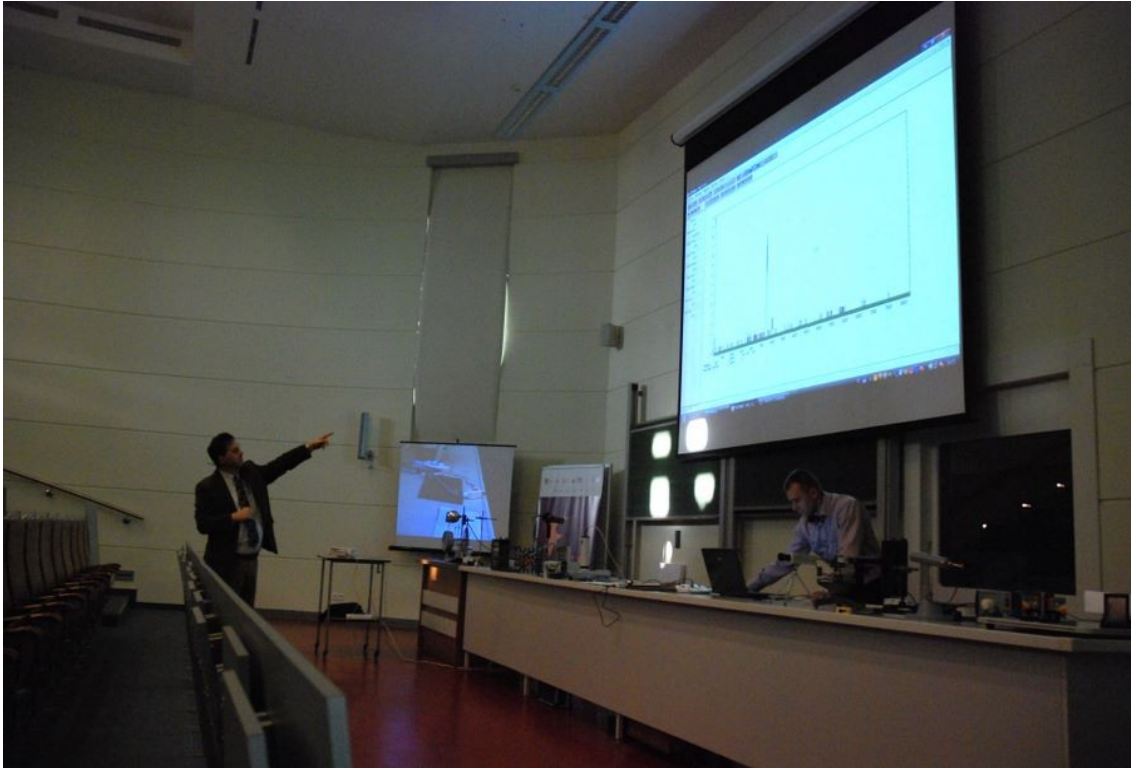
To nie gimnastyka tylko demonstracja grubej osłony ołowianej pochłaniającej promieniowanie



Oto źródło ^{241}Am promieniowania α wzbudzające wtórnie promieniowanie X



Zestaw do pomiaru promieniowania rentgenowskiego detektorem półprzewodnikowym



Widmo charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego miedzi