

# UKŁAD KOINCYDENCYJNY

*BUDOWA I ZASTOSOWANIA*

*JACEK BZDAK*

# 1 WPROWADZENIE

Układy koincydencyjne są jednymi z podstawowych narzędzi nowoczesnej fizyki jądrowej i cząsteczkowej, pozwalają wykryć zjawiska zachodzące równocześnie, co pozwala modelować przebieg procesów jądrowych i cząsteczkowych pomimo immanentnie statystycznej natury tych gałęzi fizyki.

Przykładowo rozważmy eksperyment Comptona. Mamy następującą teorię – kwant gamma uderza w wolny elektron który jest wybijany pod kątem  $\theta$ , a kwant gamma jest odchylany pod kątem  $\varphi$ , przy czym między tymi kątami zachodzi związek:  $ctg\theta = (1 + \frac{h\nu_0}{m_0c^2})tg\frac{\varphi}{2}$ , a pomiędzy energiami rozproszonego kwantu i elektronu zachodzi taka a taka zależność. Bez układu koincydencyjnego taka teoria jest niemożliwa do sprawdzenia – będzie można powiedzieć że rozkłady (geometryczne i energetyczne) kwantów i elektronów wyglądają w określony sposób, natomiast nie będzie można nic powiedzieć o samym procesie. Dzięki układowi koincydencyjnemu możemy zbadać zbieżność czasową rejestrowania kwantu gamma pod kątem  $\varphi$  i energią  $E_\gamma$ , co daje solidne podstawy do wnioskowania że proces zachodzi w opisany wcześniej sposób.

Przykład ten podałem nie bez kozery – w istocie istniały niegdyś wątpliwości dotyczące natury zasad zachowania energii i pędu – mianowicie zastanawiano się czy mają one naturę tylko statystyczną. Walther Bothe (noblista z fizyki – 1954r) z zastosowaniem bardzo prymitywnego układu koincydencyjnego wykazał że prawa zachowania obowiązują też dla pojedynczych kolizji w eksperymencie Comptona. Przytaczając samego Bothe:

Ostatecznym, otrzymanym przez nasz eksperyment, wynikiem było to że koincydencje rzeczywiście zachodzą z częstotliwością która wynika z geometrii eksperymentu, oraz z rozkładu prawdopodobieństw, przy założeniu że w każdym jednostkowym procesie Comptona, rozproszony kwant oraz odbity elektron powstają *jednocześnie*. Ścisła prawdziwość prawa zachowania energii została w ten sposób wykazana i błyskotliwe rozwiązanie problemu podwójnej natury wielocząsteczkowej zaproponowane przez Bohra, Kramera i Slatera okazało się być ślepą uliczką<sup>1</sup>.<sup>[1]</sup><sup>2</sup>

## 2 WŁASNOŚCI UKŁADÓW KOINCYDENCYJNYCH

W ogólności układy koincydencyjne mają  $n$  wejść oraz jedno wyjście, na wyjściu pojawia się impuls, tylko wtedy gdy jest on na wszystkich wejściach. W praktyce układy koincydencyjne są niedoskonałe i charakteryzują się następującymi cechami

- **Czas rozdzielczy** – określa maksymalny interwał  $\tau$  pomiędzy impulsami, dla którego impulsy zostaną potraktowane jako równoczesne – tj. dla którego zostanie wygenerowany sygnał wyjściowy.

1 Chodzi o rozwiązanie problemu galowo cząsteczkowej natury promieniowania gamma, które odrzucało zasady zachowania energii i pędu dla poszczególnych zdarzeń, lecz zakładały ich poprawność jedynie statystycznie – dla dużej ich ilości.

2 Tłumaczenie własne.

## - Własności układów koincydencyjnych -

- **Współczynnik wyboru** – iloraz  $\rho = \frac{V_c}{V_{nc}}$  odpowiedzi układu w przypadku pojawienia się sygnałów na wszystkich wejściach (zachodzi koincydencja  $V_c$ ), oraz odpowiedzi układu jeśli impuls pojawił się na  $n-1$  wejściach (nie zachodzi koincydencja).
- **Czas martwy** – minimalny czas pomiędzy rejestracją dwóch zdarzeń koincydencyjnych,
- **Czułość koincydencji** – minimalna amplituda sygnałów wejściowych konieczna do zarejestrowania koincydencji
- **Skuteczność koincydencji** – wskazuje jaki procent faktycznych koincydencji jest rejestrowany przez urządzenie.

### 2.1 NIEPEŁNA KOINCYDENCJA

Stosuje się też układy reagujące na niepełną koincydencję, które rejestrują zdarzenie koincydencyjne przy zarejestrowaniu impulsów na np. 2 z 25 czujników.

## 3 SCHEMAT BLOKOWY

W układzie koincydencyjnym można wyróżnić trzy bloki:

- **Blok wejściowy (BW)** – blok standaryzujący impulsy wejściowe.
- **Układ wyboru (UW)** – blok sprawdzający koincydencję
- **Standaryzator (ST)** – blok standaryzujący impuls wyjściowy.



Rysunek 1: Schemat blokowy

### 3.1 BLOK WEJŚCIOWY

Blok wejściowy standaryzuje impulsy wejściowe, jeżeli dokonywane na nich są tylko liniowe przekształcenia (takie urządzenia określa się typem *overlap*), czas rozdzielczy urządzenia będzie zależny od czasu trwania impulsów. By zrozumieć dlaczego rozważmy że układ ma czas rozdzielczy równy zero, przychodzą do niego dwa impulsy prostokątne o długości  $2 \mu s$ , przy czym jeden jest opóźniony względem drugiego o  $1 \mu s$ . Układ rozpozna je jako koincydencyjne gdyż był czas w którym sygnały z impulsów były jednocześnie na wejściach układów.

Wyróżnia się też urządzenia regeneracyjne – w których sygnał po przefiltrowaniu przez BW ma postać prostokątnego impulsu o znanej amplitudzie i czasie trwania.

## 4 IMPLEMENTACJE

Historycznie układy koincydencyjne miały bardzo wiele różnych implementacji, skoncentrujemy się na implementacjach układów wybierających.

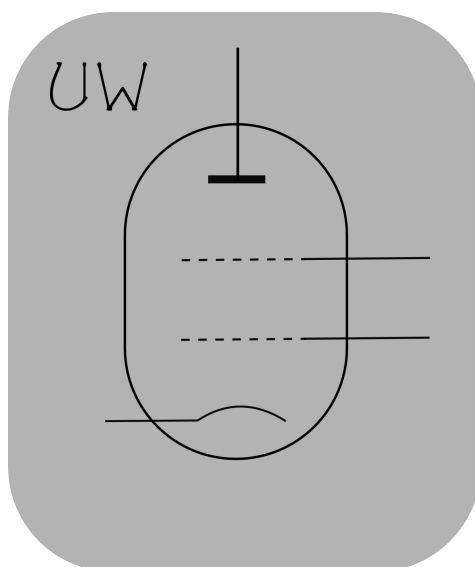
### 4.1 ORYGINALNE ROZWIĄZANIE BOTHE

W swoim eksperymencie Bothe używał rejestratorów kwantów gamma które rejestrowały zliczenia na papierowych taśmach. W ten sposób można było ręcznie porównać czasy poszczególnych zdarzeń z dokładnością rzędu  $10^{-4}$  s.

### 4.2 LAMPA ELEKTRONOWA Z DWOMA SIATKAMI

Jest to również rozwiązanie wprowadzone przez Bothe. Układ Wyboru stanowiła lampa elektronowa z dwoma siatkami. Układ w stanie spoczynku jest ustawiony tak że katoda jest spolaryzowana ujemnie, anoda dodatnio, natomiast na siatki przykłada się zaporowe napięcie ujemne, w wyniku czego prąd przez diodę nie płynie. Blok Wejściowy stworzono tak że przy przyjściu sygnału na jedno z wejść na odpowiedniej siatce napięcie zaporowe znikało. Przy koincydencji prąd płynął obniżając napięcie na anodzie – co stanowiło sygnał zajścia koincydencji.

Rozdzielczość tego typu układów jest bardzo różna – prototyp bohtego charakteryzował się bardzo kiepskimi parametrami , jednak nowoczesne tego typu układy mają już dużo lepsze parametry.



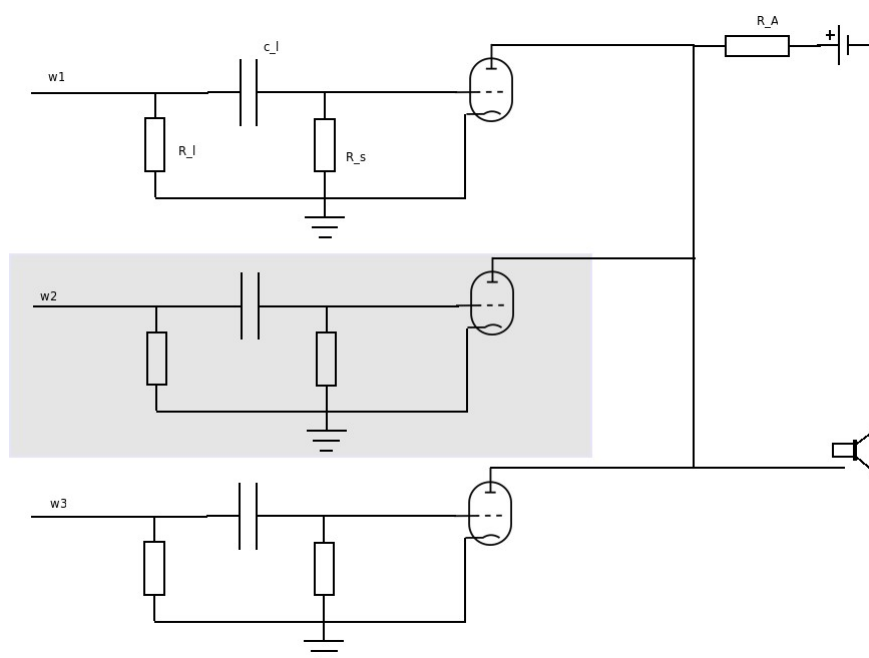
Rysunek 2: Układ Bohtego

### 4.3 UKŁAD ROSSIEGO

Był to układ mierzący koincydencję trzech sygnałów. Układ wybierający stanowiły trzy bloki zawierające po jednej triodzie. Wejścia do układu (oryginalnie anody liczników Geigera-Mullera) podłączone są do siatek triod. Siatkom za pomocą oporów  $R_S$  z baterii pomocniczej daje się ujemne napięcie, tak że przez diodę płynie prąd anodowy dopóki w podłączonym liczniku nie wystąpi wyładowanie. W chwili wyładowania dioda jest blokowana, powoduje to lekki spadek prądu sumarycznego płynącego przez diody, i lekki wzrost potencjału na anodach diod. Zablokowanie

wszystkich powoduje spadek prądu płynącego przez układ praktycznie do zera, oraz zmniejsza znacznie spadek napięcia na oporze  $R_A$ , wywołuje to wzrost napięcia na wyjściu układu, które potem (w różny sposób) przekłada się na zliczenie. W oryginalnym układzie za licznik służył głośnik, przy którym siedział asystent[2]<sup>3</sup>.

Ważną cechą układu Rossiego, było to że relatywnie łatwo można było skonstruować układ rejestrujący koincydencje wielokrotne, starczyło do tego powielić odpowiednio wiele razy blok zaznaczony na szaro (i dobrać odpowiednie wartości oporów i pojemności).



Rysunek 3: Układ Rossiego

## 5 ZASTOSOWANIA EKSPERYMENTALNE

### 5.1 BADANIA PROMIENIOWANIA KOSMICZNEGO

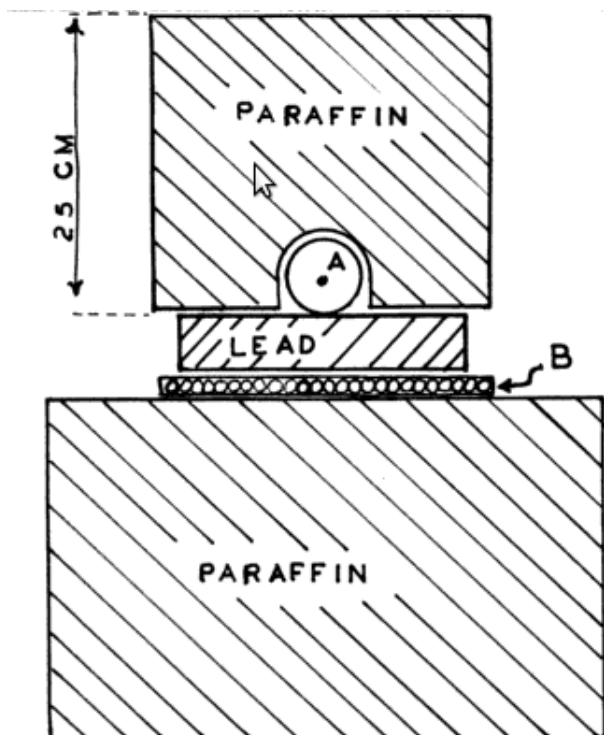
Rossi dzięki swojemu układowi koincydencyjnemu był w stanie zbadać wiele nieznanych cech promieniowania kosmicznego.

Pierwszym eksperymentem w którym zastosował on swój nowy układ było wykazanie wielkich zdolności penetracyjnych tego promieniowania. Układ eksperymentalny składał się z dwóch detektorów promieniowania podłączonych do układu koincydencyjnego. W pierwszym kroku doświadczenia mierzono ilość koincydencji, następnie pomiędzy detektory włożono złotą płytę o grubości 4.1 cm, okazało się że liczba zdarzeń spadła nieznacznie. W kolejnych eksperymentach zwiększano grubość tarczy.

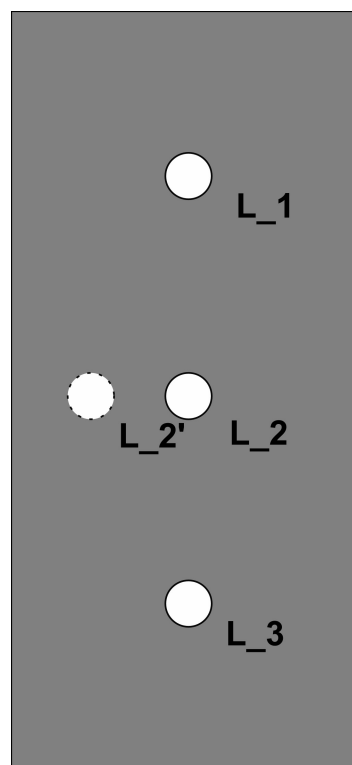
Korzystając z podobnego układu Rossi wykazał że w promieniowaniu kosmicznym są cząstki o energii ponad 1 GeV, układ składał się z trzech liczników podzielonych osłonami ołowowymi o łącznej grubości ponad 1m. Gdy licznik  $L_2$  przesuwano na pozycję  $L_2'$ , liczba koincy-

<sup>3</sup> W literaturze znalazłem kilka układów które miały być układami Rossiego, jednak ich budowa różniła się od siebie. W pracy umieściłem ten do którego dano zrozumiały dla mnie opis.

dencji gwałtownie spadała dowodząc że cząstki powodujące koincydencje wcześniej, przebiegały przez metrowej grubości blok ołowiu. Dalsze wyliczenia pozwały oszacować dolną granicę ich energii na 1 GeV.



Rysunek 5: Układ eksperymentalny do badania kaskad cząstek



Rysunek 4: Badanie maksymalnej energii cząstek promieniowania kosmicznego

Drugim eksperymentem, przy którym również zastosowano układ koincydencyjny, było udowodnienie istnienia tak zwanych kaskad cząstek (z ang. *shower*), układ składa się z wielu czujników ułożonych na płaszczyźnie tak by były w podobnej odległości od źródła kaskady. We wcześniejszych eksperymentach zaobserwowano pierwsze kaskady atmosferyczne po prostu rejestrując koincydentne zdarzenia w oddalonych od siebie w poziomie licznikach

Wykorzystywano też układy badające niepełną koincydencję. Przykładowo w badaniach nad produkcją neutronów w kaskadach starczała koincydencja 2 z 25 liczników Geigera. Układ był następujący (rys 5): w parafinowym bloku (który zwalniał neutrony) zatopiono czujnik neutronów (A), pod tym układem zamontowano płytę ołowianą oraz 25 czujników Geigera (B). Za kaskadę uznawano koincydentne impulsy z dwóch liczników Geigera i z czujnika neutronów[3]. Bardzo podobny układ eksperymentalny wykorzystywał Rossi gdy wprowadził rozróżnienie na miękkie i twarde promieniowanie kosmiczne<sup>4</sup>.

## 5.2 ENERGIA PROMIENIOWANIA $\gamma$

Stosując dwa czujniki w układzie koincydencyjnym i zmiennej grubości płyty absorpcyjnej można zmierzyć średnią energię promieniowania  $\gamma$  przelatującego przez układ. [1]

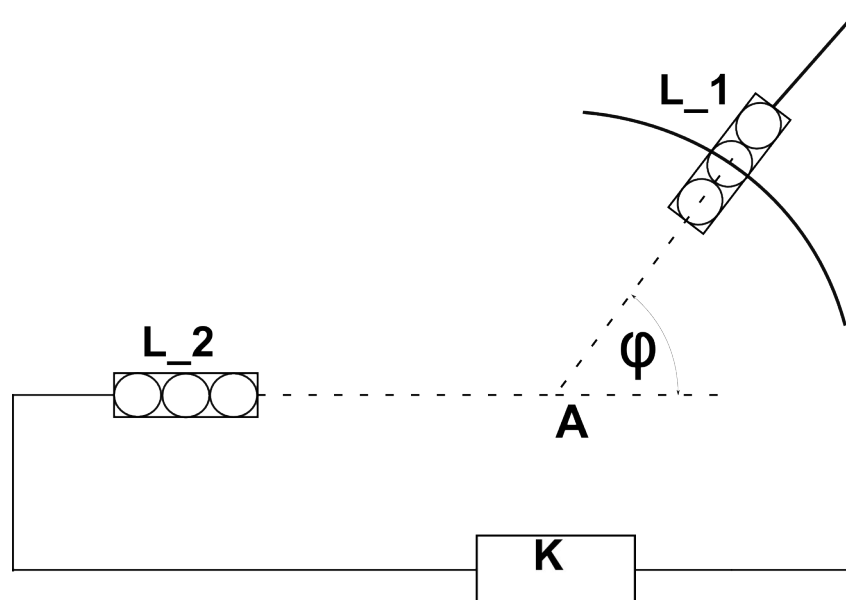
<sup>4</sup> Miękkie promieniowanie powodowało kaskady w blokach ołowianych (miało zatem bardzo kiepską zdolność penetracji), natomiast promieniowanie twarde (złożone z mionów) potrafiło penetrować metrowe bloki ołowiu.

### 5.3 WYKAZANIE WAŻNOŚCI ZASADY ZACHOWANIA PĘDU DLA POJEDYNCZYCH ZDARZEŃ JĄDROWYCH

Rozważmy eksperyment przeprowadzony przez dwóch fizyków radzieckich<sup>5</sup>, służył on zbadaniu zasady zachowania pędu przy dwufotonowej anihilacji pary elektron-pozyton. Źródłem promieniowania była próbka izotopu miedzi wysyłająca promieniowanie  $\beta^+$ , które jednak anihilowało w samej próbce wysyłając promieniowanie  $\gamma$ . Promieniowanie gamma rejestrowały dwie grupy liczników Geigera-Mullera (prawdopodobieństwo absorpcji kwantu  $\gamma$  było na tyle małe, że jeden licznik nie wystarczał). Jedna z grup liczników mogła być przesuwana po łuku wokół próbki.

Liczniki podłączono do układu koincydencyjnego.

Wyniki doświadczenia były wskazywały ostry pik ilości koincydencji dla przeciwległego ustawienia grup liczników.

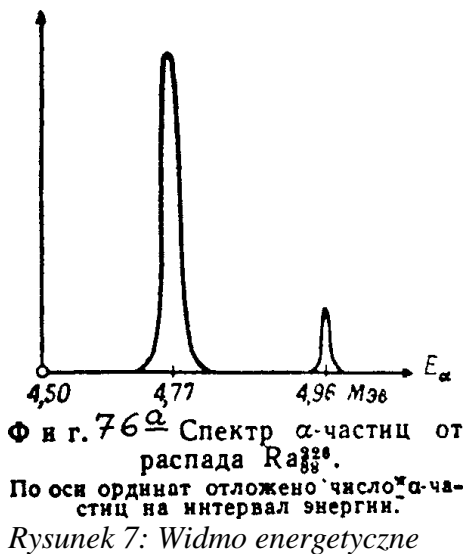


Rysunek 6: Układ Dzelepowa

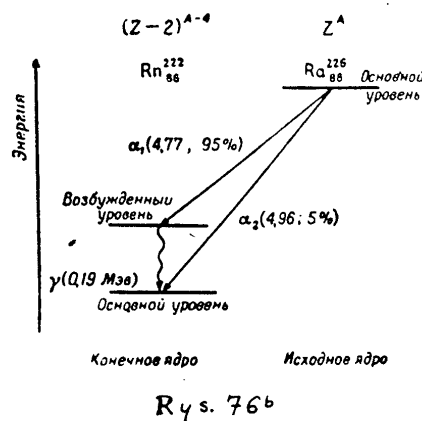
### 5.4 ROZPADY ATOMOWE

Podczas badań rozpadów  $\alpha$  radu  ${}^{226}_{88}$  wykryto dwie linie energetyczne (rysunek 7), był to zaskakujący wynik, gdyż oczekiwano raczej jednej linii – odpowiadającej faktycznej energii wynikającej z defektu masy.

<sup>5</sup> Dokładnie chodzi o Własowa i Dzelepowa.



Zapostulowano jednak następujący mechanizm rozpadu wyjaśniający linię o mniejszej energii – powstający atom radonu jest w stanie wzbudzonym, z którego przechodzi do stanu podstawowego drogą emisji kwantu  $\gamma$ .



Rysunek 8: Postulowany schemat rozpadu alfa radu

Zapostulowano więc następujący schemat rozpadu:

- **linia o niższej energii** – przy emisji cząstki  $\alpha$  powstaje atom Rn w stanie wzbudzonym, który następnie przechodzi do stanu podstawowego drogą emisji kwantu  $\gamma$
- **linia o wyższej energii** – przy emisji cząstki  $\alpha$  powstaje atom Rn w stanie podstawowym

#### 5.4.1 EKSPERYMENTALNE WYKAZANIE TAKIEGO SCHEMATU ROZPADU

By wykazać taki schemat rozpadu należy zastosować układ koincydencyjny, badający koincydencje emisji kwantów  $\gamma$  i cząstek  $\alpha$ . W takim układzie powinnyśmy rejestrować tylko cząstki  $\alpha$  o niższej energii.



## 6 LITERATURA

- 1: Walther Bothe, Wykład wygłoszony podczas ceremonii wręczenia nagrody Nobla, 1954, [http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1954/bothe-lecture.html](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1954/bothe-lecture.html)
- 2: Szczwniawski Szczepan, Fizyka Doświadczalna VI, 1974
- 3: S. A. Kroff, The production of neutrons by the cosmic radiation, z The Proceedings of American Phys. Society, 1941, [http://books.google.pl/books?id=R1QLAAAAIAAJ&printsec=toc&dq=coincidence+circuit&lr=&as\\_brr=1&as\\_pt=ALLTYPES&source=gbs\\_summary\\_s&cad=0#PPP11,M1](http://books.google.pl/books?id=R1QLAAAAIAAJ&printsec=toc&dq=coincidence+circuit&lr=&as_brr=1&as_pt=ALLTYPES&source=gbs_summary_s&cad=0#PPP11,M1)  
(skrótowy: <http://infobot.pl/r/1asf>)

## 7 ILUSTRACJE

Rysunek 1: Schemat blokowy.....	3
Rysunek 2: Układ Bothego.....	4
Rysunek 3: Układ Rossiego.....	5
Rysunek 4: Badanie maksymalnej energii cząstek promieniowania kosmicznego.....	6
Rysunek 5: Układ eksperymentalny do badania kaskad cząstek .....	6
Rysunek 6: Układ Dżelepowa.....	7
Rysunek 7: Widmo energetyczne.....	8
Rysunek 8: Postulowany schemat rozpadu alfa radu.....	8