

**Politechnika Warszawska**  
**Wydział Fizyki**

Praca zaliczeniowa z przedmiotu:

# **Metody i Techniki Jądrowe**

*Detektory gazowe promieniowania jonizującego i ich  
zastosowania w badaniach naukowych, dozymetrii i  
przemysle*

Prowadzący przedmiot:  
prof. dr hab. Jan Pluta

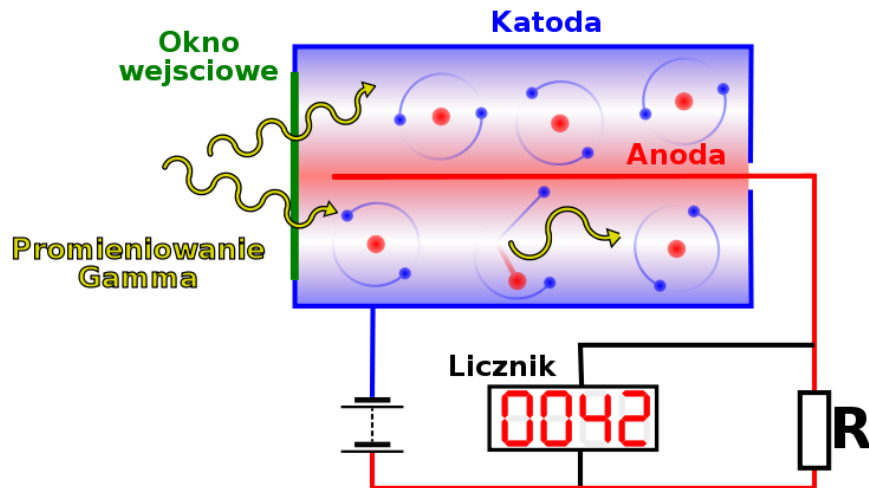
Małgorzata Szurmańska  
nr indeksu: 238037

## Spis treści

1. Wstęp .....	3
2. Licznik Geigera- Müllera .....	4
3. Komora jonizacyjna .....	6
4. Licznik proporcjonalny .....	8
5. Wielodrutowa komora proporcjonalna .....	10
6. Komora dryfowa.....	12
7. Komora projekcji czasowej.....	14
8. Komora iskrowa .....	18
9. Mikropaskowy detektor gazowy – GEM .....	19
10. Spis ilustracji.....	23
11. Bibliografia .....	24

## 1. Wstęp

Detektory gazowe to detektory cząstek naładowanych, w których materiałem roboczym jest gaz. Cząstka naładowana przechodząc przez gaz jonizuje go – odrywa elektrony od atomów. W dalszym etapie cząstki te docierają do anody, co skutkuje nagromadzeniem się na niej ładunków i powstanie sygnału elektrycznego.



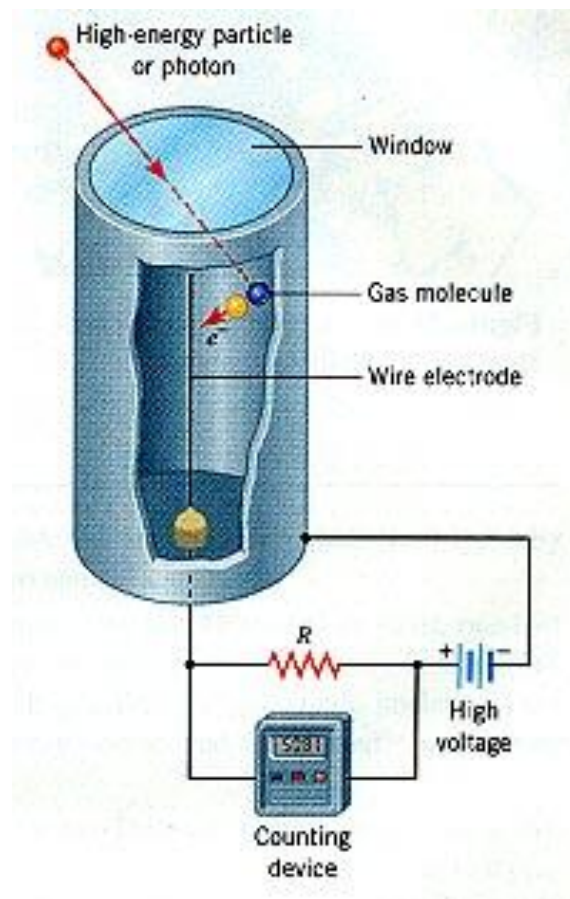
Rysunek 1. Schemat budowy detektora gazowego. [1]

Detektory gazowe cechuje przede wszystkim fakt, że jonizacja pojedynczego atomu gazu zachodzi dla ok. 30 eV ( w powietrzu 34 eV). Ponadto wzmocnienie sygnału na anodzie jest rzędu 10000 razy na wskutek wysokiego napięcia przyłożonego na katodę i anodę. Detektory gazowe charakteryzują się również wzmocnieniem gazowym, czyli powieleniem pierwotnych elektronów w silnym polu elektrycznym.

Istnieje wiele typów detektorów gazowych. Zapoznajmy się z najważniejszymi.

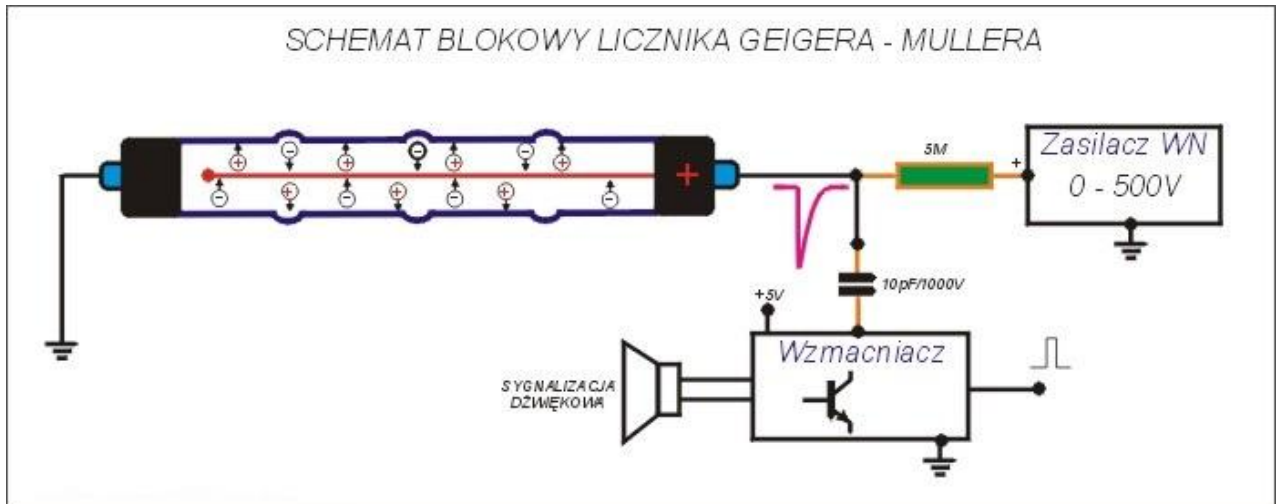
## 2. Licznik Geigera- Müllera

Licznik Geigera- Müllera jest jeden z najbardziej znanych detektorów jonizacyjnych. Składa się z dwóch elektrod. Zewnętrzna elektroda zwykle ma kształt cylindrycznej metalowej rurki zamkniętej z obu stron izolatorem, wewnątrz której wzdłuż jej osi symetrii umieszczony jest cienki drut wolframowy, który jest drugą elektrodą-dodatnią. Wnętrze metalowej rurki jest wypełnione gazem szlachetnym np. argonem. Rysunek poniżej przedstawia budowę licznika Geigera- Müllera.



Rysunek 2. Schemat budowy licznika Geigera- Müllera [2]

Do elektrod przyłożone jest wysokie napięcie ok. 400V. Jony z obszaru między walcem i drucikiem są przyspieszane przez pole elektryczne i biegną w kierunku zewnętrznej elektrody ujemnej (anody). Podczas tej drogi jony napotykają kolejne jony gazu i jonizują je powodując wyładowanie lawinowe. Elektroda ujemna wychwytuje jony i rejestruje daną liczbę zliczeń. Rysunek poniżej przedstawia schemat działania licznika Geigera- Müllera.



Rysunek 3. Schemat działania licznika Geigera-Mullera [3]

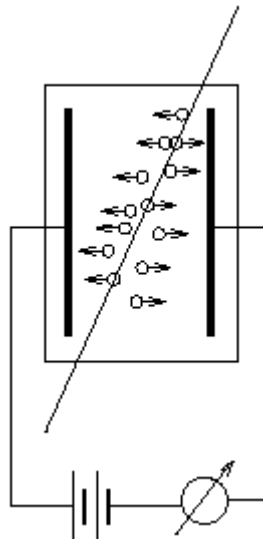
Niestety nie wszystkie jony są rejestrowane. Bardzo ważnym parametrem jest tutaj czas martwy licznika. Czas martwy jest to okres od rozpoczęcia wyładowania do jego wygaśnięcia, zatem w tym czasie promieniowanie nie może być zarejestrowane. Aby przyspieszyć wygaśnięcie wyładowania często w szczelnej tubie oprócz gazu szlachetnego znajduje się niewielka ilość alkoholu pod zmniejszonym ciśnieniem, co skutecznie gasi wyładowanie.

#### Zastosowanie licznika Geigera- Müllera

Licznik najczęściej jest stosowany w przenośnych urządzeniach do wykrywania skażeń. Dostarcza informacji typu: czy jest podniesiony poziom natężenia promieniowania jonizującego.

### 3. Komora jonizacyjna

Komora jonizacyjna składa się na ogół z obudowy oraz dwóch elektrod; kształt i wymiary elektrod mogą być rozmaite w zależności od przeznaczenia komory. Spotyka się płaski, cylindryczny lub kulisty układ elektrod. Do elektrod przyłożone jest napięcie o takiej wartości, która zapewnia uzyskanie natężenia pola elektrycznego umożliwiającego zbieranie całego ładunku wytworzonego na skutek pierwotnej jonizacji w komorze. Nierzadko jedna z elektrod jest uziemiona, a druga jest elektrodą zbiorczą i w związku z tym umocowana jest w izolatorze wykonanym z materiału charakteryzującego się dużą opornością właściwą (bursztynu, teflonu itp.).



Rysunek 4. Schemat działania komory jonizacyjnej [4]

Pod względem konstrukcji komory jonizacyjne można podzielić na następujące grupy:

- Komory, w których rejestrowane są cząstki powstające w objętości czynnej komory, czyli w objętości gazu, która objęta jest bezpośrednim działaniem pola elektrycznego wytworzonego między elektrodami. Komory tej grupy są wykorzystywane głównie do pomiaru jonizacji wywołanej przez cząstki  $\alpha$ , jak również w niektórych przypadkach - przez neutrony.
- Komory, w których rejestrowane są nie tylko cząstki powstające w objętości czynnej, lecz także cząstki docierające do tej objętości z warstwy gazu ją otaczającego, przy czym grubość tej warstwy jest równa co najmniej zasięgowi cząstek. Komory te są zwane komorami o swobodnym gazie i są stosowane do bezwzględnych pomiarów dawki w rentgenach (komory normalne).
- Komory, w których rejestrowane są nie tylko cząstki powstające w objętości czynnej, lecz także cząstki docierające do tej objętości z otaczających ją ścianek, wskutek czego znaczna część całkowitego prądu jonizacyjnego jest wytworzona przez cząstki wybite ze ścianek komory przez padające promieniowanie. Komory te są zwane komorami kondensatorowymi lub komorami naporstkowymi (niezależnie od tego, czy są one podobne do naporstka, czy nie); stosuje się je (po uprzednim przeskalowaniu zgodnie z wynikami pomiaru uzyskanymi za pomocą komór normalnych) do pomiarów względnych promieniowania  $\beta$ , X,  $\gamma$  oraz strumieni neutronów.

W zależności od zastosowania komory jonizacyjne można podzielić na następujące dwie grupy:

- komory do pomiaru całego ładunku lub prądu powstałego w wyniku procesów zachodzących w objętości komory - komory prądowe
- komory do pomiaru oddzielnych impulsów, wywołanych przez poszczególne cząstki - komory impulsowe

Komory impulsowe można podzielić na:

- komory szybkie, w których występuje zbieranie ładunku niesionego przez elektrony i
- komory powolne, w których występuje zbieranie ładunku niesionego zarówno przez dodatnie, jak i ujemne jony.

Komory jonizacyjne poszczególnych rodzajów nie są na ogół detektorami uniwersalnymi, tj. nie nadają się do pomiarów wszystkich rodzajów promieniowania jonizującego. Przydatność poszczególnych typów komór do pomiarów danego rodzaju promieniowania jest widoczna poniżej:

Rodzaj promieniowania	Komory prądowe		Komory impulsowe	
	Pomiar natężenia prądu	Pomiar ładunku	Pomiar częstości impulsów	Spektrometria
$\alpha$	✓	✓	✓	✓
$\beta$	✓	✓		
$\gamma$	✓	✓		
Neutrony termiczne	✓	✓	✓	
Neutrony prężkie	✓	✓	✓	✓

Rysunek 5. Przydatność poszczególnych typów komór jonizacyjnych do pomiaru danego rodzaju promieniowania.

#### 4. Licznik proporcjonalny

Licznik proporcjonalny zbudowany jest podobnie do komory jonizacyjnej. Różnica polega na większym napięciu międzyelektrodowym. Zwiększenie napięcia powoduje zwiększenie energii jonów i elektronów w polu elektrycznym. Przy niesprężystych zderzeniach tych cząstek z cząsteczkami gazu wytwarzają one dodatkowe jony i elektrony. Następuje tzw. jonizacja wtórna. Ta jonizacja powoduje zwiększenie liczby ładunków docierających do elektrod. Energia potrzebna do osiągnięcia jonizacji wtórnej wyraża się wzorem:

$$E(r) = \frac{1}{r} \frac{V}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}$$

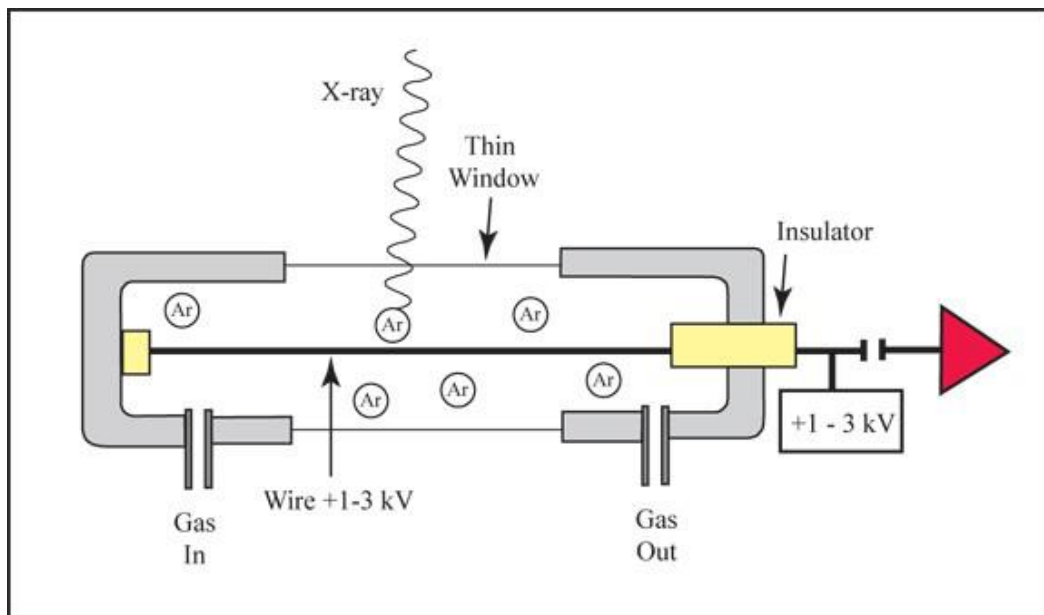
Gdzie:

r - odległość od anody

V - napięcie przyłożone do anody

b - wewnętrzna średnica cylindra

a - średnica drutu anody



Rysunek 6. Schemat działania licznika proporcjonalnego [5]

Katoda zazwyczaj jest zbudowana z miedzi, aluminium lub grafitu, zaś anodę najczęściej wykonuje się ze stali nierdzewnej lub wolframu.

Liczniki proporcjonalne używane są zarówno do zliczania liczby cząstek, lub kwantów promieniowania, jak i do określania ich energii. Znajdują zastosowanie do pomiarów promieniowania  $\alpha, \beta, \gamma$  oraz rentgenowskiego jak i pomiarów neutronów prędkich i neutronów termicznych.



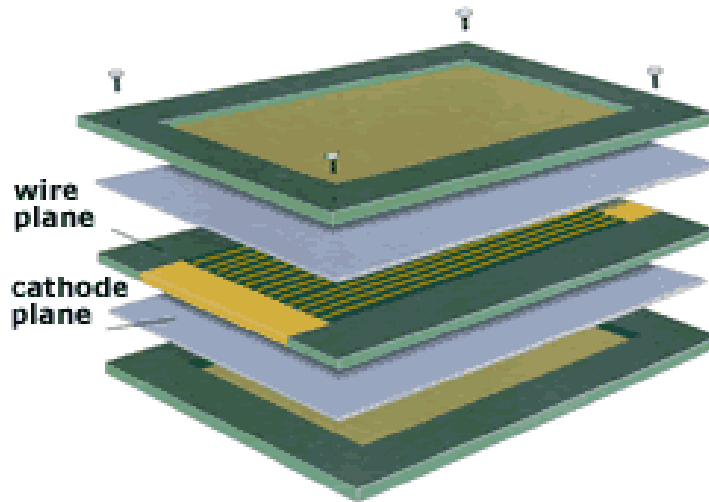
## Zastosowanie liczników proporcjonalnych

Ze względu na szczegółowe rozwiązania konstrukcyjne liczników proporcjonalnych wynikające z ich optymalizacji pod kątem rodzaju pomiaru wyróżnia się:

- liczniki proporcjonalne przepływowe wykorzystywane do pomiarów całkowitej aktywności promieniowania alfa lub promieniowania beta,
- liczniki proporcjonalne wewnętrznego napełniania służące do pomiaru aktywności gazów radioaktywnych,
- rentgenowskie liczniki proporcjonalne,
- liczniki proporcjonalne z trójfluorkiem boru służące do detekcji neutronów termicznych (dzięki reakcji neutronów z borem z emisją cząstek alfa)
- liczniki proporcjonalne protonów odrzutu.

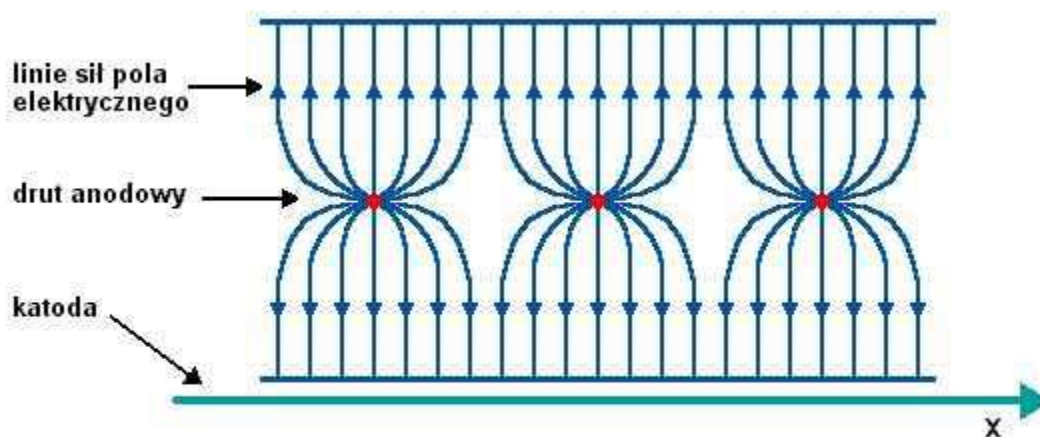
## 5. Wielodrutowa komora proporcjonalna

Wielodrutowa komora proporcjonalna, (ang. Multiwire Proportional Chamber (MWPC))  
Jednym z podstawowych wymagań fizyki wysokich energii jest określenie toru cząstki.  
Stosując MWPC można go określić. Zawiera wiele, blisko siebie, równo rozmieszczonych  
oraz znajdujących się w jednej płaszczyźnie drutów anodowych, z których każdy pełni  
funkcję niezależnego licznika proporcjonalnego. Każdy drut posiada swoją własną  
elektronikę. Druty są centralnie rozmieszczone między dwoma płaszczyznami katod.



Rysunek 7. Schemat budowy wielodrutowej komory proporcjonalnej [6]

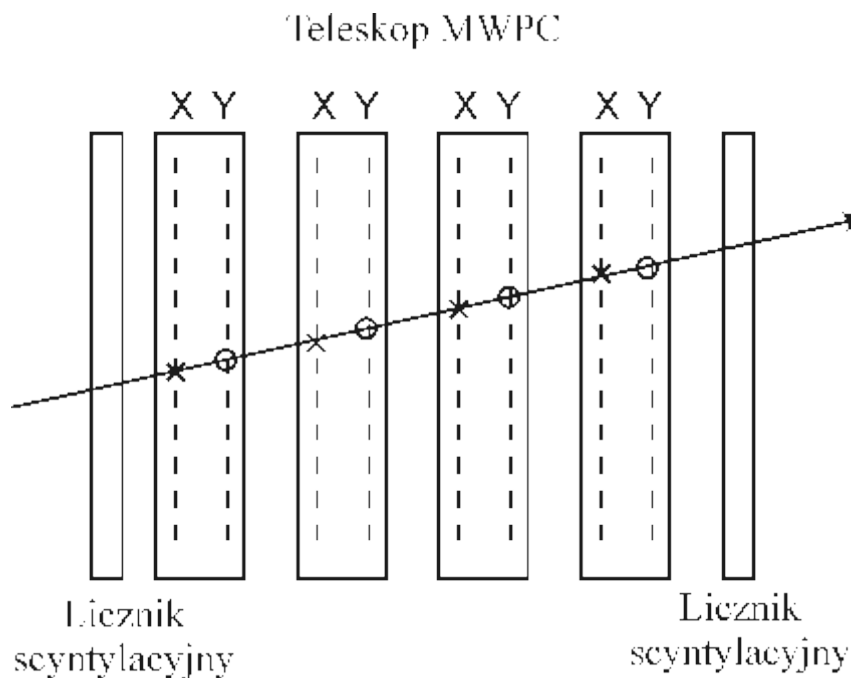
Jeśli przyłożymy ujemne napięcie do katod to linie sił pola elektrycznego są równoległe i prawie stałe z wyjątkiem obszaru blisko anod.



Rysunek 8. Struktura pola elektrycznego wielodrutowego licznika proporcjonalnego [7]

W obszarze blisko anod pole ma zależność od odległości jak  $1/r$  jak dla cylindrycznej komory proporcjonalnej. Jeśli elektrony i jony są wyzwolone w stałym polu będą one dryfowały odpowiednio do najbliższej anody lub katody. Kiedy elektrony osiągną obszar silnego pola będą szybko przyspieszane i wyprodukują lawinę. Dodatkowo jony wyprodukowane w procesie wtórnej jonizacji dają ujemny sygnał na anodzie. Sąsiednie druty anodowe także odczuwają lawinę jednakże sygnał na drutach jest dodatni i mniejszy. W podobny sposób sygnał jest wytwarzany na katodzie.

Sygnał z jednej płaszczyzny anod daje informację tylko o jednej współrzędnej punktu jonizacji. Drugą współrzędną można otrzymać stosując drugi detektor, którego druty anodowe są prostopadłe względem pierwszej płaszczyzny. Zwykle obydwa detektory są umieszczone w tej samej komorze w formie X-Y MWPC lub ukośnie. Aby zarejestrować tor lotu cząstki można kilka komór ustawić obok siebie w formie teleskopu, co pozwoli na rekonstrukcję toru. Rozdzielczość przestrzenna komory proporcjonalnej zależy od odległości między drutami i wynosi pół tej wartości. Dodatkową własnością komór jest możliwość rozróżnienia wielu torów.

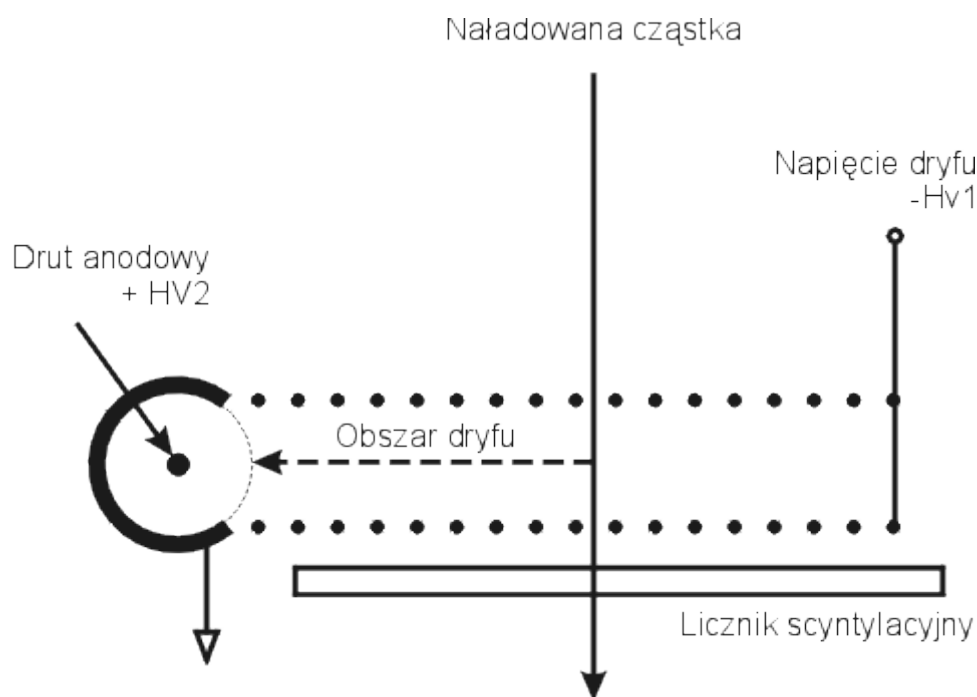


Rysunek 9. Teleskop MWPC służący do obserwacji śladów cząstki. Każdy detektor MWPC ma dwie płaszczyzny drutów (X i Y). Jeśli detektory są umieszczone w szeregu pomiar współrzędnych pozwala na rekonstrukcję toru cząstki [8]

## 6. Komora dryfowa

Komora dryftowa jest zbudowana podobnie jak licznik proporcjonalny. W stosunku do komory proporcjonalnej ma wydłużony obszar dryftu.

Komórką komory dryfowej jest elektroda pod wysokim napięciem z jednego końca i włóknem anody stanowiącej prosty licznik proporcjonalny z drugiego końca. Aby stworzyć stałe pole elektryczne rząd katodowych drutów wytwarzających pole utrzymuje obszar dryftu w odpowiednich zakresach napięcia. Aby zaznaczyć przybycie cząstki umieszczono licznik scyntylacyjny, który całkowicie pokrywa komorę i jest umieszczony przed lub za komorą. Przechodząca cząstka wyzwala elektrony w gazie, które podążają w kierunku anody. W tym samym czasie szybki sygnał ze scyntylatora zaczyna odliczać czas. Kiedy sygnał wytworzony przez elektrony dociera do anody wówczas licznik kończy odliczanie.

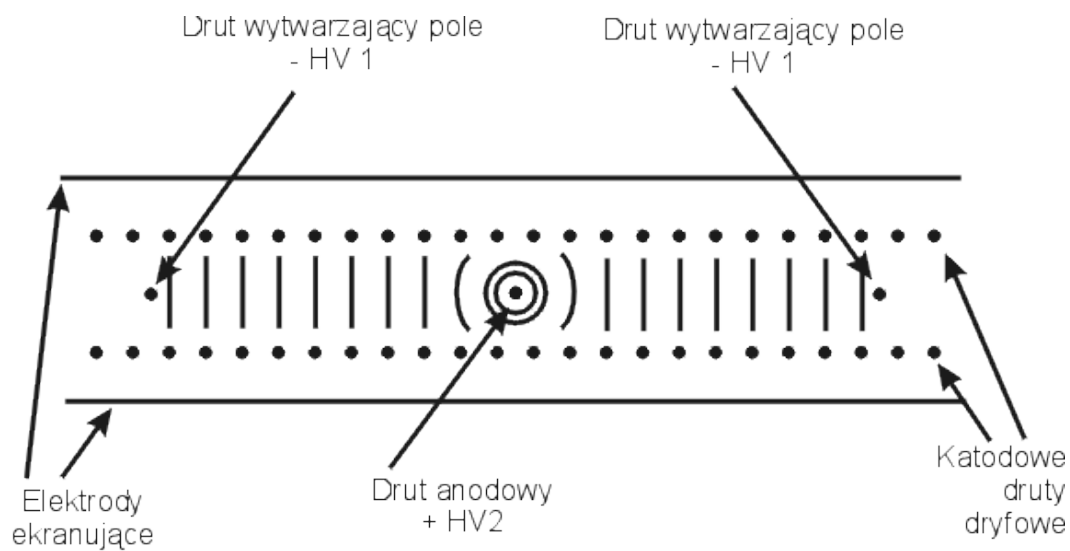
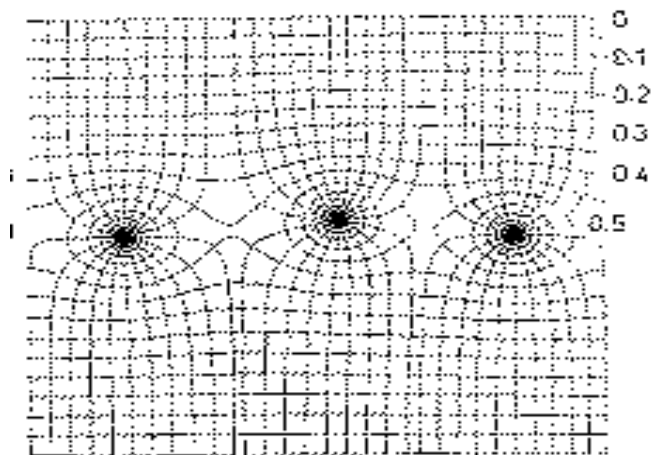


Rysunek 10. Schemat działania komory dryfowej [9]

Zwykle droga dryftu wynosi około 5-10 cm. Typowa prędkość dryftu to około 5 cm/us, co daje czas dryftu 1-2 us. Aby pokryć większy obszar detektora można użyć kilku komórek ustawionych sąsiadująco i w ten sposób zbudować metrowe komory dryfowe.

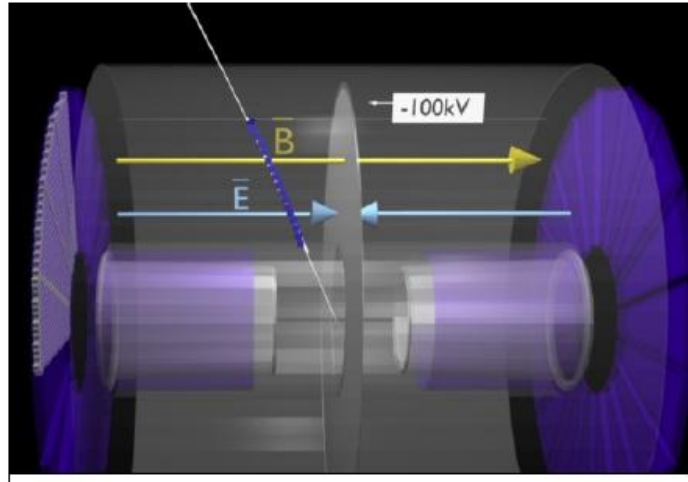
Problemem jest niejednorodność pola w pobliżu anod. Aby poprawić tę niedogodność dodaje się druty wytwarzające pole w przestrzeni między drutami anodowymi. Tu potencjał na drutach katodowych nie jest stały, lecz zmienia się od 0 (uziemiaenie) - dla drutów katodowych w pobliżu drutu anodowego do dużej wartości ujemnej blisko drutów z polem. W ten sposób uzyskuje się bardziej jednorodne pole. Rysunek poniżej przedstawia rozwiązanie problemu niejednorodności pola w pobliżu anod.

## ROZWIĄZANIE PROBLEMU NIEJEDNORODNOŚCI POŁA W POBLIŻU ANOD



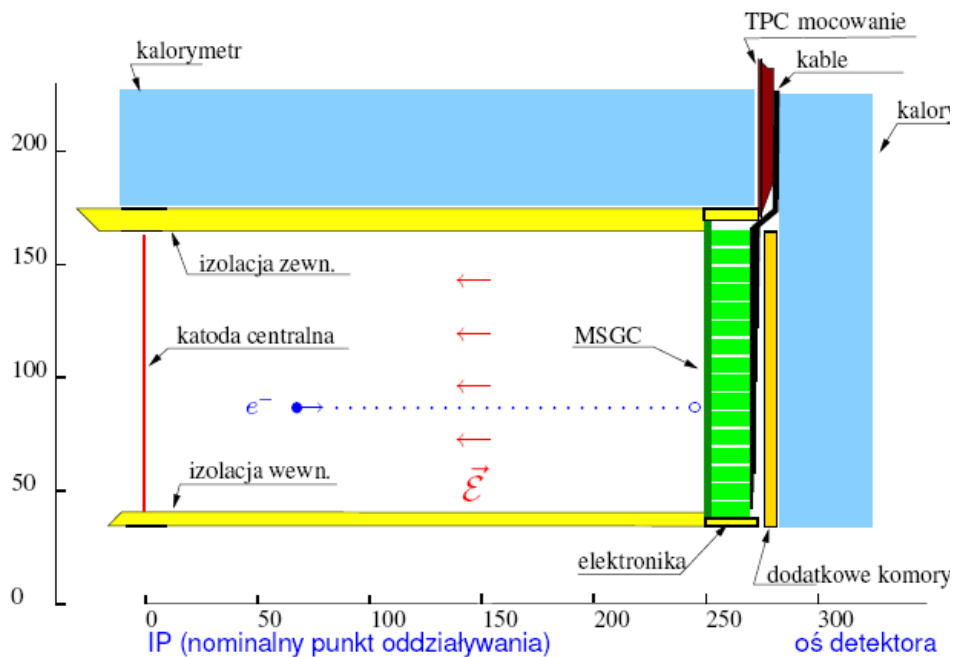
## 7. Komora projekcji czasowej

Komora projekcji czasowej (Time Projection Chamber - TPC) bierze tak naprawdę to co najlepsze z MWPC i komory dryftowej. Detektor ten posiada cylindryczny kształt, z wewnętrzną elektrodą wykonaną z folii poliestrowej pokrytej aluminium i dwiema zewnętrznymi płytami podzielonymi na segmenty, zawierające łącznie prawie 560 tys. mniejszych segmentów o różnej wielkości.



Rysunek 11. Schemat budowy komory projekcji czasowej [10]

Naładowana cząstka przelatująca przez gaz powoduje wytworzenie chmury naładowanych cząstek wzdłuż drogi (jonizację gazu). Cząstki o ujemnym ładunku zaczynają przemieszczać się – dryfować w stronę zewnętrznych płyt detektora (dlatego TPC nazywamy detektorem dryfowym). Na końcach cylindra znajdują się uporządkowane w szeregi druty anodowe działające jak liczniki proporcjonalne. Równoległe do każdego włókna umieszczone są paski katodowe pocięte na prostokątne segmenty. Te segmenty nazywane są katodowymi padami.



Rysunek 12. Schemat komory TPC [11]

Po dotarciu do zewnętrznych płyt cząstki są wzmacniane i zapisywane razem z czasem dryfu przez niemal 560 000 mierników, umożliwiając rekonstrukcję toru lotu cząstki.

Gęstość chmury elektronowej docierającej do mierników pozwala na odróżnienie różnych rodzajów cząstek (np. protonów i pionów), a zakrzywienie drogi spowodowane polem magnetycznym pozwala na określenie jej pędu.

### Zastosowanie komory projekcji czasowej

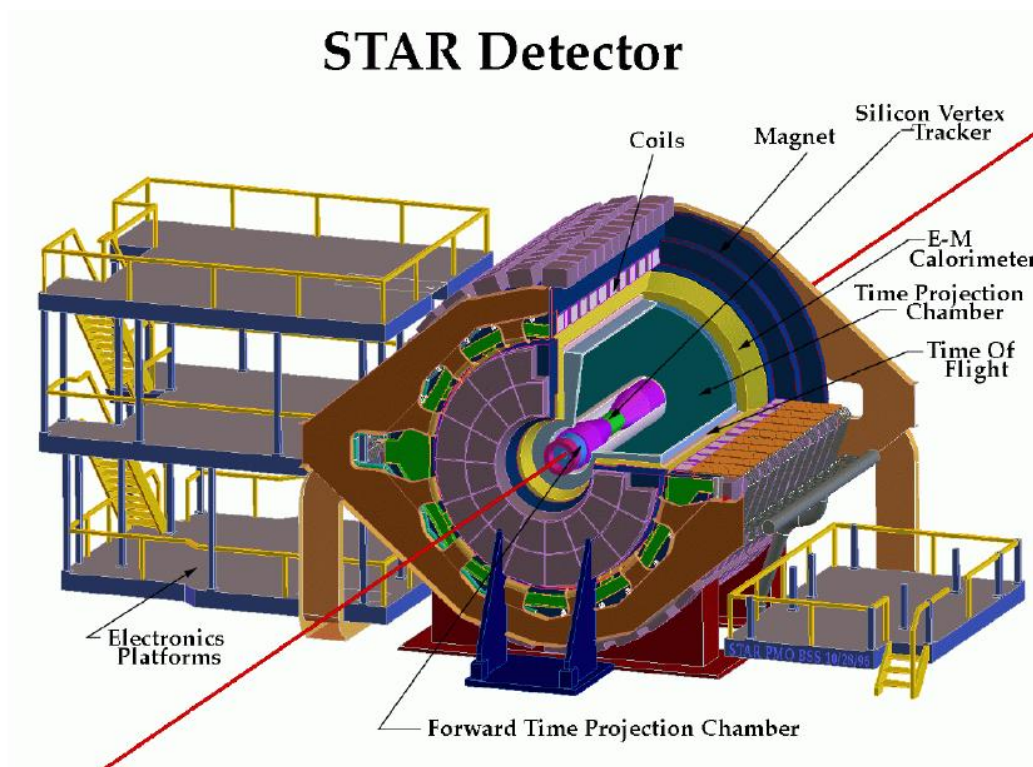
Komora projekcji czasowej jest typem detektora, który pozwala na odtworzenie torów cząstek w trzech wymiarach. Obecnie jest wykorzystywana w wielu eksperymentach na skalę światową. Poniżej przybliżono kilka najważniejszych eksperymentów z wykorzystaniem komory projekcji czasowej.

- Eksperyment STAR

STAR ( Solenoidal Tracker At RHIC ) jest eksperymentem przeznaczonym do badań zderzeń ciężkich jonów przy ogromnych energiach rzędu 100GeV/u dla Au, czy też 500GeV dla protonów.

Komora TPC jest głównym urządzeniem pomiarowym eksperymentu STAR. Detektor ten dostarcza niezbędnych informacji w zakresie nakreślenia torów cząstek powstałych w zderzeniu, pomiaru ich pędu oraz ich identyfikacji. Proces identyfikacji możliwy jest dzięki bardzo precyzyjnym pomiarom strat jonizacyjnych.

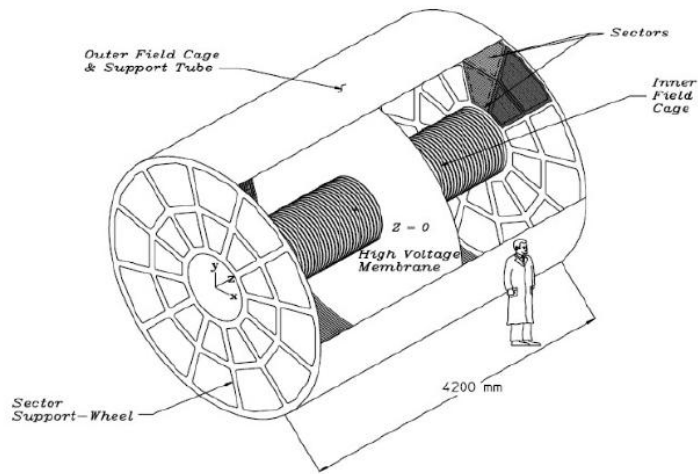
Poniżej przedstawiono umiejscowienie komory projekcji czasowej w detektorze STAR.



Rysunek 13. Schemat budowy detektora STAR [20]



Wewnętrzny i zewnętrzny promień w TPC wynoszą odpowiednio 50 i 200 cm. Poniżej przedstawiono schemat budowy komory TCP eksperymentu STAR.

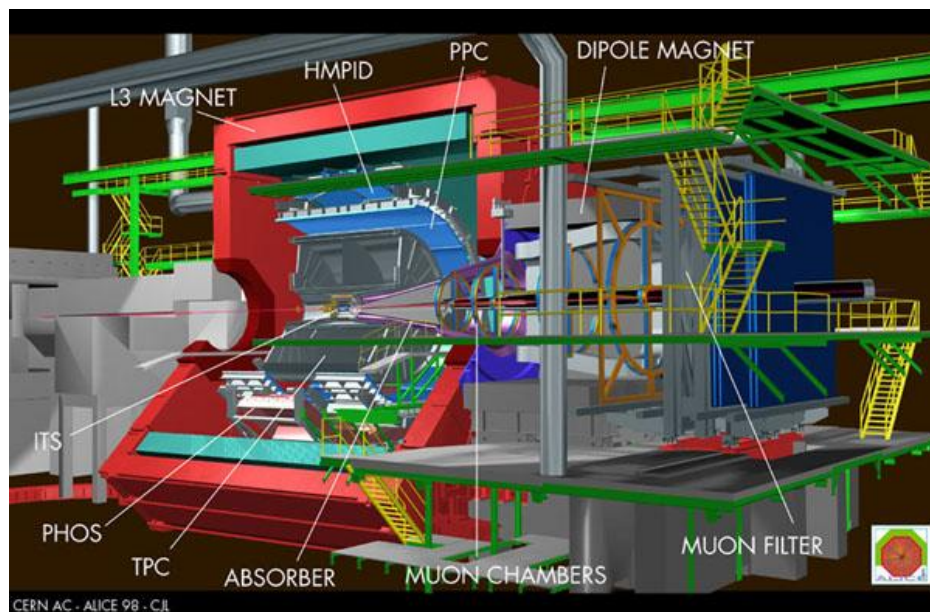


Rysunek 14. Schemat komory TCP eksperymentu STAR [21]

- Eksperyment ALICE

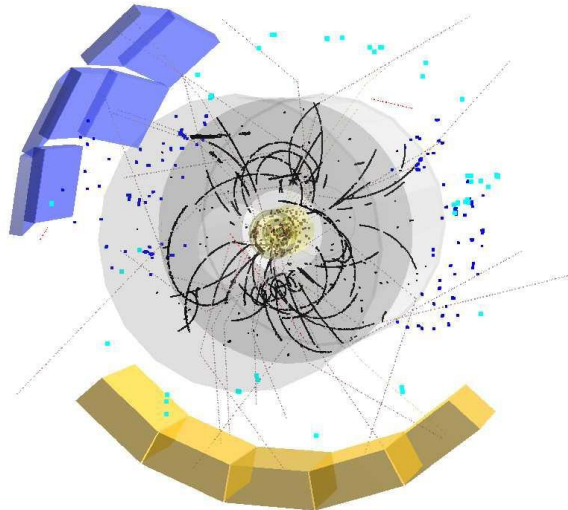
Zastosowanie tego detektora w eksperymencie ALICE jest takie samo jak w STAR. Różnica polega na budowie i parametrach i wynika z warunków pracy detektora TPC. Wewnętrzny promień detektora wynosi 88 cm i jest wyznaczony przez maksymalną akceptancję gęstości torów w TPC. Zewnętrzny promień (250 cm) jest określony przez długość potrzebną do uzyskania rozdzielczości 7% w pomiarach strat energii. Dzięki temu TPC może rejestrować sygnały pochodzące od cząstek o pędach poprzecznych bliskich wartości 2.5 GeV/c. Długość detektora wynosi 5 m, podobnie jak w eksperymencie STAR.

Poniżej przedstawiono umiejscowienie komory TPC w detektorze ALICE.



Rysunek 15. Umiejscowienie TCP wewnątrz detektora ALICE [12]



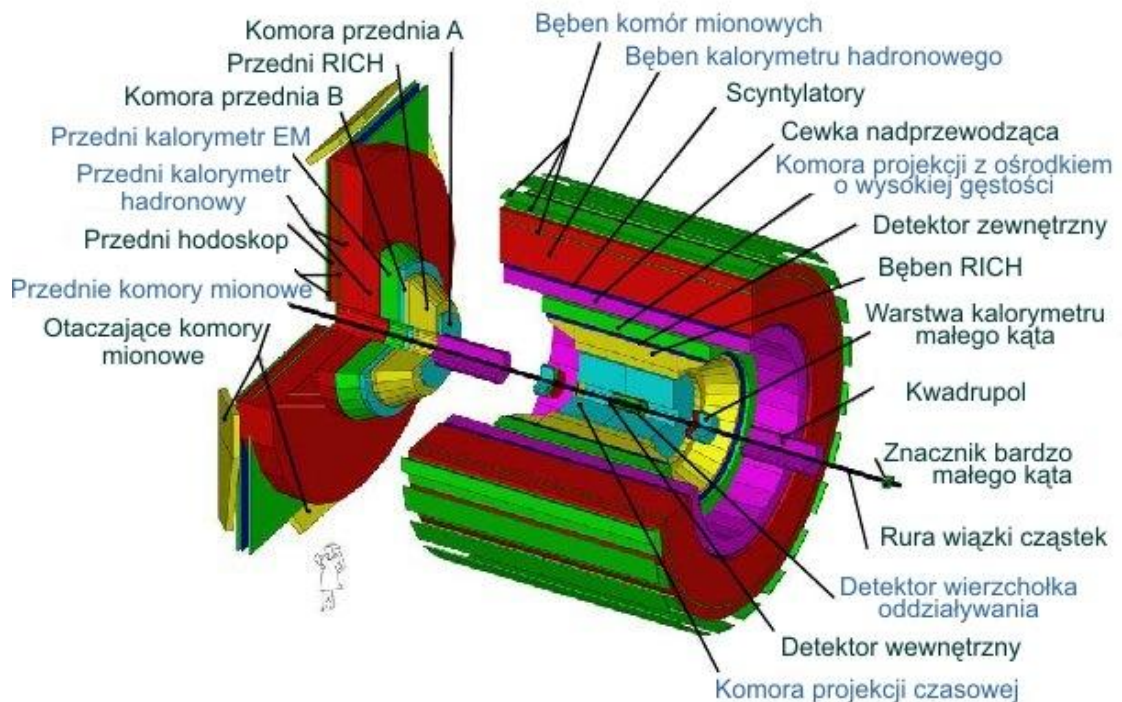


Rysunek 16. Zarejestrowane ślady cząstek TCP w detektorze ALICE [13]

- Eksperyment DELPHI

Komora TPC została wykorzystana również w detektorze DELPHI. Detektor ten jest urządzeniem złożonym z kilkunastu wyspecjalizowanych detektorów pokrywających prawie cały kąt bryłowy. Całość ma kształt walca o długości ok. 10 m i podobnej średnicy. Detektor ten został zaprojektowany jako detektor uniwersalny co oznacza, że obejmuje on prawie pełny kąt bryłowy, rejestruje tory cząstek naładowanych i mierzy ich pędy, mierzy energie możliwie wszystkich rodzajów cząstek naładowanych i neutralnych, identyfikuje cząstki w możliwie szerokim zakresie ich pędu oraz mierzy światłość akceleratora. Zastosowana w detektorze DELPHI komora TPC ma kształt wydrążonego walca o zewnętrznym promieniu 120 cm i długości 300 cm.

Schemat budowy detektora DELPHI przedstawiono poniżej.



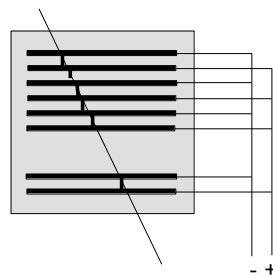
Rysunek 17. Schemat budowy detektora DELPHI [22]

## 8. Komora iskrowa

Komora iskrowa jest detektorem wizualnym, służącym do rejestracji torów cząstek naładowanych, których ślady są uwidocznione przez łańcuszek iskiei, powstałych pomiędzy zbiorem równoległych płaskich elektrod umieszczonych w ośrodku gazowym.

W zasadzie komora iskrowa składa się z wielu równoległych elektrod płaskich, pomiędzy którymi istnieje chwilowe pole elektryczne o natężeniu 10 - 20 kV/cm. Podczas przechodzenia cząstki pomiędzy dwoma elektrodami powstaje iskra. Ślad cząstki składa się z wielu iskiei pomiędzy kolejnymi elektrodami, które na zarejestrowanym obrazie są w postaci odcinków prostopadłych do elektrod.

Wytwarzający pole impuls elektryczny jest przykładany z pewnym opóźnieniem w stosunku do przelotu wiązki co pozwala na regulowanie wydajności rejestracji, która może być praktycznie 100%. Kształt impulsu elektrycznego ma duży wpływ na rozwój iskiy dokładnie w kierunku obserwowanego śladu.



Rysunek 18. Komora iskrowa [14]

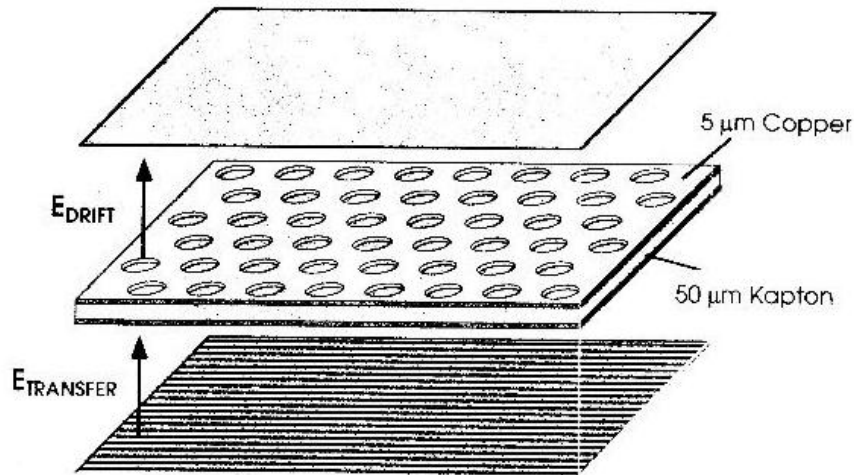
Przed nową obserwacją komorę trzeba oczyścić z istniejącej w niej jonizacji przykładając odpowiednie, niezbyt wysokie, pole elektryczne. Ślad iskiei w komorze utrzymuje się przez czas, który zmniejsza się wraz ze zwiększaniem pola czyszczącego, zmniejszaniem ciśnienia gazu roboczego i zmniejszaniem odległości między elektrodami. Przy większej odległości pomiędzy elektrodami wyładowanie jest stabilniejsze.

Zaletą komory iskrowej jest prosta konstrukcja i niezawodność działania. Stosowanie elektrod o różnej grubości pozwala na zmianę ilości materii, przez którą przechodzi cząstka.

## 9. Mikropaskowy detektor gazowy – GEM

GEM- ang. Gas Electron Multiplier, to sprawdzona i dokładna technologia detektorów gazowych. Detektor zbudowany z folii kaptonowej o grubości 50  $\mu\text{m}$ , obłożony cienką warstwą miedzi (5  $\mu\text{m}$ ) po obu stronach i gęsto perforowany.

Wysokie napięcie jest przyłożone między warstwami miedzi produkując efekt lawinowy w dziurach. Całość umieszczona jest w polu elektrycznym pozwalającym na zbieranie dryfujących elektronów na elektrodzie odczytu.

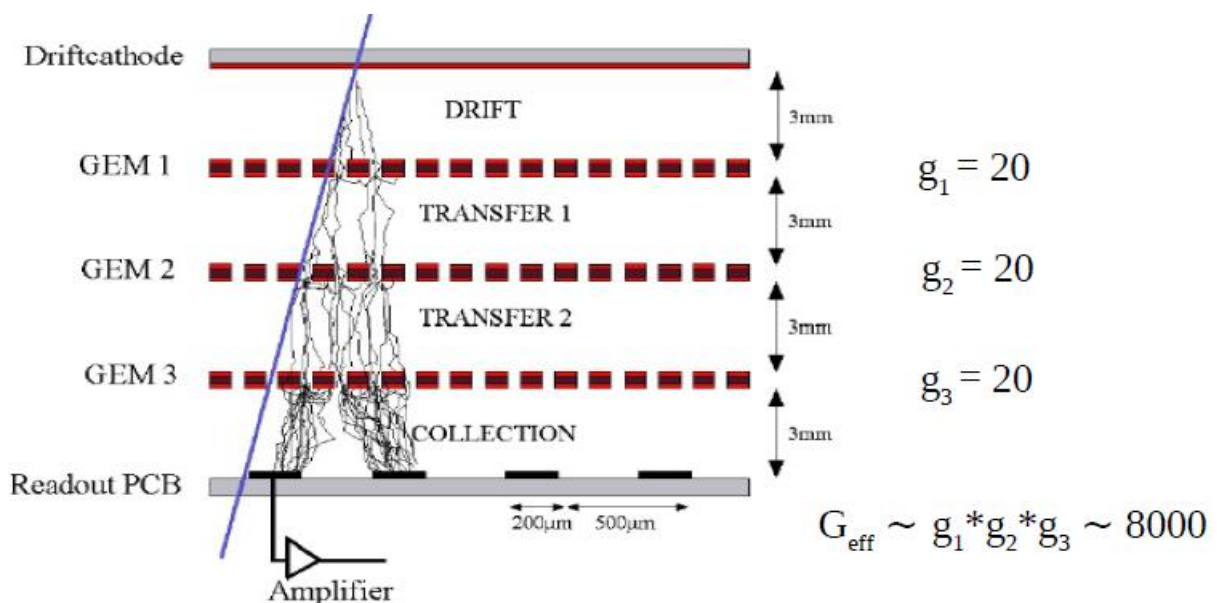


Rysunek 19. Schemat budowy detektora GEM [14]

Przykładając napięcie 400-500 V pomiędzy warstwami miedzi tworzymy w otworach pole elektryczne przekraczające nawet 100 kV/cm. Otwory stają się kanałami powielającymi dla elektronów wyprodukowanych w gazie przez cząstki jonizujące.

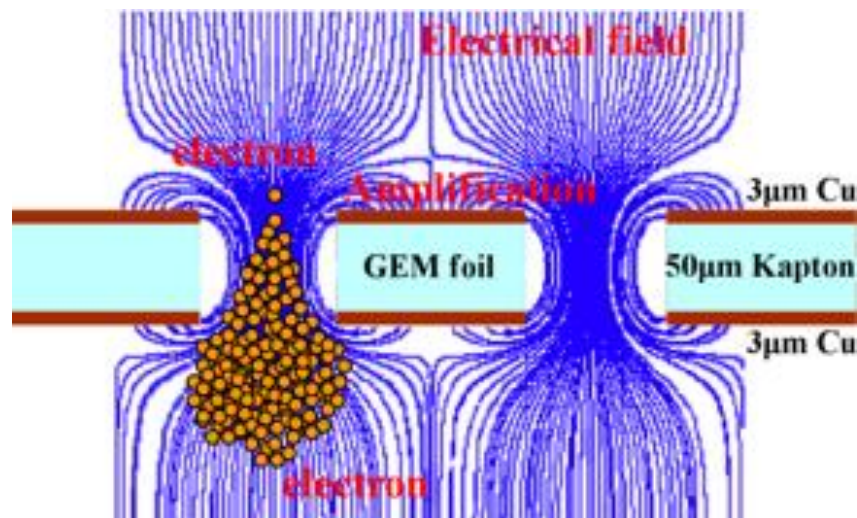
Przy użyciu pojedynczej folii GEM można łatwo osiągnąć wzmocnienia dochodzące do 1000 razy.

Większe wzmocnienia przy bezpieczniejszej pracy detektora osiąga się łącząc w kaskadę dwie lub trzy folie.



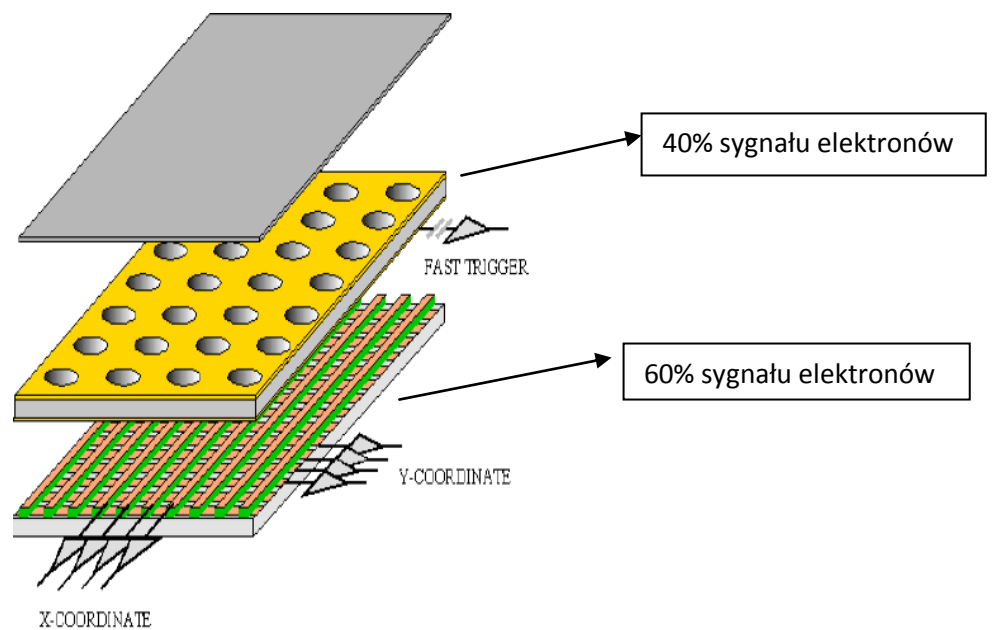
Rysunek 20. Potrójny GEM [15]

Jony są tworzone w zasadzie tylko wewnątrz dziur i potem neutralizowane na wierzchniej elektrodzie GEMu. Nie docierają do strefy zbierania ładunku co było problemem wcześniejszych detektorów gazowych (zniekształcanie pola).



Rysunek 21. Wzmocnienie elektronów w detektorze GEM wewnątrz dziur [16]

Ładunek elektronów jest zbierany na elektrodzie odbioru (praktycznie dowolna geometria). Szybka odpowiedź może być uzyskana z dolnej elektrody GEM.



Rysunek 22. Odczyt sygnału z poszczególnych warstw detektora GEM [17]

Najważniejsze zalety detektora GEM:

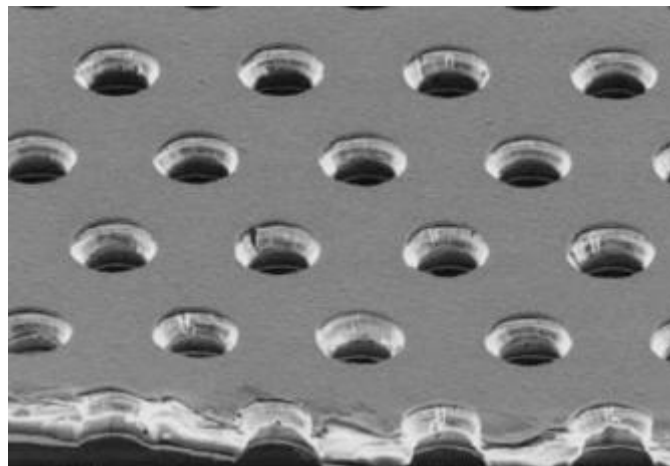
- Niezależne liczniki proporcjonalne pozwalają na pracę przy dużej częstotliwości
- Przestrzenna separacja obszaru powielania i zbierania ładunku, co zapobiega powstaniu w detektorze wyładowań iskrowych
- Praktycznie dowolna konfiguracja odczytu
- Użycie wielostopniowych GEM pozwala na obniżenie napięć przy zwiększonym wzmocnieniu i bezpieczniejszą pracę detektora.
- duże wzmocnienie przy praktycznie każdym rodzaju gazu



## Zastosowanie detektora GEM

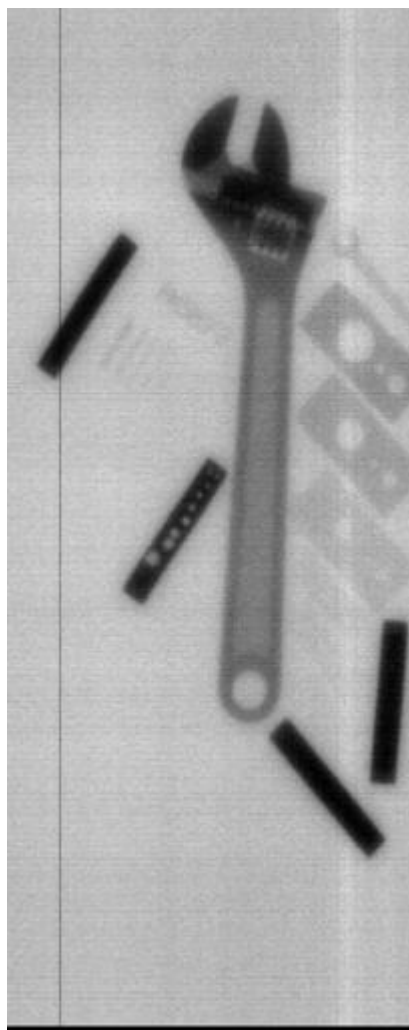
Detektor oparty o folie typu GEM dedykowany jest przede wszystkim do radiograficznych badań nieniszczących. Badania nieniszczące obejmują całą grupę metod pomiarowych i obrazujących dostarczających informacji o cechach, własnościach oraz stanie testowanych obiektów, często o ich konstrukcji wewnętrznej. Stosowane są w celu wykrycia korozji, uszkodzeń wewnętrznej struktury materiału, wad materiałowych, oceny jakości spawów itp. Do badań nieniszczących zalicza się m.in. badania ultrasonograficzne i radiograficzne.

W badaniach radiograficznych wykorzystujemy promieniowanie jonizujące typu X i  $\gamma$ , o energiach dopasowanych do rodzaju prześwietlanych obiektów. Źródłem promieniowania mogą być lampy RTG, izotopy promieniotwórcze oraz akceleratory: liniowe akceleratory elektronów bądź betatrony z tarczą konwersji, dzięki której uzyskuje się emisję promieniowania X. Tradycyjnie używanym dawniej detektorem była klisza fotograficzna. Jej zaletami były i nadal są wysoka rozdzielczość, niska cena i powszechna dostępność. Do wad zaliczyć należy konieczność chemicznego wywoływania i koszty z tym związane, przechowywanie (katalogi, szafy, magazyny), niską dynamikę obrazów, brak możliwości komputerowych metod korekcji i modyfikacji obrazów (kontrast, jasność, sumowanie, odejmowanie, filtry itp.), brak możliwości obrazowania w czasie rzeczywistym i np. bieżącej obserwacji i rejestracji zachodzących procesów. Dlatego naturalną drogą rozwoju techniki radiografii jest tzw. radiografia cyfrowa – czyli wykorzystanie detektorów elektronicznych wyświetlających obraz bezpośrednio na ekranie komputera. Dzięki detektorowi opartemu na foliach typu GEM możemy uzyskiwać obrazy wysokiej rozdzielczości w czasie rzeczywistym, wyposażony jest w odpowiednio dobrany konwerter promieniowania X/ $\gamma$  na elektrony, jedną lub więcej folii typu GEM powielających elektrony oraz elektroniczny system sterowania, i odczytu sygnałów. Otrzymane obrazy są przetwarzane i wyświetlane na ekranie komputera w czasie rzeczywistym.



Rysunek 23. Fragment folii GEM oglądany pod mikroskopem elektronowym, powiększenie 200x. [18]

Poniżej został przedstawiony przykładowy radiogram z wykorzystaniem wiązki akceleratora 6 MeV oraz opisywanego detektora.



Rysunek 24. Przykładowy radiogram z wykorzystaniem wiązki akceleratora 6 MeV

Detektor Gas Electron Multiplier jest dedykowanym urządzeniem do seryjnych badań radiograficznych w warunkach dużego obciążenia wysokimi dawkami promieniowania. Osiągane rezultaty potwierdzają przydatność zastosowania detektora w pracach przemysłowych. Obecnie na ukończeniu jest proces wdrażania urządzenia do seryjnej produkcji, prototyp testowany jest w Instytucie Problemów Jądrowych w Świerku.

## 10. Spis ilustracji

- [1] [http://pl.wikipedia.org/wiki/Plik:Geiger\\_Mueller\\_Counter\\_with\\_Circuit-pl.svg](http://pl.wikipedia.org/wiki/Plik:Geiger_Mueller_Counter_with_Circuit-pl.svg)
- [2] <http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/zal03/bilski/referat.html>
- [3] [http://www.portalnaukowy.edu.pl/index.php?option=com\\_content&view=article&id=146%3Alicznik-geigera-mullera&catid=59%3Afizyka-jdrowa&Itemid=110&showall=1](http://www.portalnaukowy.edu.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=146%3Alicznik-geigera-mullera&catid=59%3Afizyka-jdrowa&Itemid=110&showall=1)
- [4] <http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mtj/zal00/Bogucki/8/gazowe.html>
- [5] <http://www.if.pw.edu.pl/~kperl/HIP/detektory2010.pdf>
- [6] <http://www.if.pw.edu.pl/~kperl/HIP/detektory2010.pdf>
- [7] <http://www.if.pw.edu.pl/~kperl/HIP/detektory2010.pdf>
- [8] <http://belle2.ifj.edu.pl/belle/detektory/mwpc.htm>
- [9] [http://belle2.ifj.edu.pl/belle/detektory/komora\\_dryfowa.htm](http://belle2.ifj.edu.pl/belle/detektory/komora_dryfowa.htm)
- [10] <http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/ALICEdet/5-TPC.pdf>
- [11] <http://www.if.pw.edu.pl/~kperl/HIP/detektory2010.pdf>
- [12] <http://atomistyka.pl/promien/detekcja.html>
- [13] <http://www.if.pw.edu.pl/~kperl/HIP/detektory2010.pdf>
- [14] <http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mtj/zal00/Bogucki/8/gazowe.html>
- [15] [www.lnf.infn.it/kloe2/tools/getfile.php?doc\\_fname=K2PT-2.pdf](http://www.lnf.infn.it/kloe2/tools/getfile.php?doc_fname=K2PT-2.pdf)
- [16] <http://legacy.kek.jp/intra-e/feature/2010/DetectorMPGD.html>
- [17] <http://legacy.kek.jp/intra-e/feature/2010/DetectorMPGD.html>
- [18] <http://www.badania-nieniszczace.info/Badania-Nieniszczace-Nr-01-08-2010/Serwis-Badania-Nieniszczace-01-08-2010-art-nr10.html>
- [19] <http://www.badania-nieniszczace.info/Badania-Nieniszczace-Nr-01-08-2010/Serwis-Badania-Nieniszczace-01-08-2010-art-nr10.html>
- [20] [http://hirg.if.pw.edu.pl/hirg/components/com\\_chronocontact/uploads/prace\\_inzynierskie/20110222160413\\_Beta\\_inz\\_PW.pdf](http://hirg.if.pw.edu.pl/hirg/components/com_chronocontact/uploads/prace_inzynierskie/20110222160413_Beta_inz_PW.pdf)
- [21] [http://hirg.if.pw.edu.pl/hirg/components/com\\_chronocontact/uploads/prace\\_inzynierskie/20110222160413\\_Beta\\_inz\\_PW.pdf](http://hirg.if.pw.edu.pl/hirg/components/com_chronocontact/uploads/prace_inzynierskie/20110222160413_Beta_inz_PW.pdf)
- [22] <http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/keyhole/pl/detectors/DELPHI.html>

## 11. Bibliografia

Promieniowanie jonizujące w środowisku człowieka, P. Jaracz

<http://www.badania-nieniszczone.info/Badania-Nieniszczone-Nr-01-08-2010/Serwis-Badania-Nieniszczone-01-08-2010-art-nr10.html>

[http://hirg.if.pw.edu.pl/hirg/components/com\\_chronocontact/uploads/prace\\_inzynierskie/20110222160413\\_Beta\\_inz\\_PW.pdf](http://hirg.if.pw.edu.pl/hirg/components/com_chronocontact/uploads/prace_inzynierskie/20110222160413_Beta_inz_PW.pdf)

<http://belle2.ifj.edu.pl/belle/detektory/mwpc.htm>

<http://www.if.pw.edu.pl/~kperl/HIP/detektory2010.pdf>

<http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/za103/bilski/referat.html>

[http://www.portalnaukowy.edu.pl/index.php?option=com\\_content&view=article&id=146%3Alicznik-geigera-mullera&catid=59%3Afizyka-jdrowa&Itemid=110&showall=1](http://www.portalnaukowy.edu.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=146%3Alicznik-geigera-mullera&catid=59%3Afizyka-jdrowa&Itemid=110&showall=1)