

Mieszanki robocze w detektorach gazowych stosowanych w eksperymentach fizyki wysokich energii i mikro-dozymetrii

Autoreferat do postępowania habilitacyjnego

Tadeusz Zdzisław Kowalski

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica

30-059 Kraków

Spis treści

1. Dane personalne	4
1.1 Posiadane dyplomy, stopnie naukowe	4
1.2 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	4
2. Wskazanie osiągnięcia naukowego stanowiącego podstawę postępowania habilitacyjnego	5
2.1 Cykl publikacji będących podstawą przewodu habilitacyjnego	5
2.2 Wprowadzenie	7
2.2.1 Mieszanki gazowe w eksperymentach fizyki wysokich energii	7
2.2.2 Gazowe detektory śladowe w eksperymentach fizyki wysokich energii	9
2.2.3 Kolaboracja RD51 „Development of Micr-Pattern Gas Detector Technologies”	11
2.3 Efekt Penninga	12
2.3.1 Rozwój lawiny elektronowej w mieszaninach gazów i par	12
2.4 Omówienie prac składających się na cykl publikacji będących podstawą wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego	13
2.4.1 Przejaw efektu Penninga na krzywych wzmocnienia gazowego	13
2.4.2 Zależność efektywnego potencjału jonizacji od koncentracji czynnika gaszącego – przejaw efektu Penninga	14
2.4.3 Zależność α/p od koncentracji – przejaw efektu Penninga	16
2.4.4 Adiustacja pierwszego współczynnika jonizacji Townsenda uwzględniająca efekt Penninga w mieszaninie Ar – CO ₂	17
2.4.5 Szybkość transferu energii, r_{Pen} , w funkcji koncentracji CO ₂ przy ciśnieniu atmosferycznym	19
2.4.6 Efekt Penninga w mieszaninie Ne – CO ₂	20
2.4.7 Efekt Penninga w mieszaninie Ne – CO ₂ – N ₂	22
2.4.8 Metoda analizy danych	23
2.5 Mieszanki mikrodozymetryczne	23
2.5.1 Mikrodozymetryczna odpowiedź liczników proporcjonalnych	24
2.5.2 Ograniczenia współczynnika wzmocnienia gazowego w niskociśnieniowych licznikach proporcjonalnych wypełnionych mieszaninami tkanko podobnymi	25
2.5.3 Promień lawiny elektronowej	27
2.5.4 Praca detektorów przy wysokich natężeniach rejestrowanego promieniowania, liniowość odpowiedzi w funkcji dawki	28
2.5.5 Praca detektorów przy wysokich wzmocnieniach gazowych, liniowość odpowiedzi w funkcji wzmocnienia gazowego	29
2.6 Podsumowanie	31
3. Wykaz osiągnięć naukowo badawczych	34
3.1 Przed doktoratem (lata 1977 – 1983)	34
3.1.1 Spis publikacji i raportów z tego okresu	35
3.2 Wykaz osiągnięć naukowych po doktoracie w latach 1984-1986	35
3.2.1 Spis publikacji i raportów z tego okresu (1984 – 1986)	36

3.3	Pobyty w Europejskim Ośrodku Badań Kosmicznych, ESTEC (1986 rok)	37
3.3.1	Spis publikacji i raportów związanych z moim pobytem w ESTEC	38
3.4	Współpraca z eksperymentem ZEUS, 1988 – 2006	39
3.4.1	Testy prototypu kalorymetru BAC na wiązkę	39
3.4.2	System gazowy kalorymetru BAC, informacje ogólne	39
3.4.3	Mój udział w budowie systemu gazowego kalorymetru BAC	39
3.4.4	Spis publikacji i raportów związanych z moją współpracą z eksperymentem ZEUS	40
3.5	Współpraca z eksperymentem ATLAS	42
3.5.1	Uwagi ogólne o eksperymencie ATLAS i detektorze promieniowania przejścia TRT	42
3.5.2	Mój udział w budowie detektora promieniowania przejścia TRT eksperymentu ATLAS	43
3.5.3	Publikacje i raporty związane z moją współpracą z detektorem TRT eksperymentu ATLAS	43
4.	Sumaryczny Impact Factor publikacji naukowych	45
4.1	Sumaryczny Impact Factor (publikacje w cyklu habilitacyjnym)	46
4.2	Całkowita liczba publikacji	46
4.3	Stáže naukowe odbyte za granicą	47
4.4	Otrzymane nagrody	47
4.5	Udział w konferencjach międzynarodowych	48
5.	Działalność dydaktyczna i organizacyjna	48
5.1	Działalność dydaktyczna	48
5.2	Prowadzone zajęcia dydaktyczne	48
5.3	Wykłady zewnętrzne	49
5.4	Wykaz prac magisterskich wykonanych pod moją opieką	
5.5	Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze opiekuna naukowego lub promotora pomocniczego	50
5.6	Członkostwo w organizacjach międzynarodowych	50
5.7	Działalność organizacyjna	50
5.8	Udział w grantach jako wykonawca	50
6.	Uwagi końcowe	50
7.	Podziękowania	51

1. Dane Personalne

Tadeusz Zdzisław Kowalski

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

Tel.: 12 617 33 75

email: Tadeusz.Kowalski@fis.agh.edu.pl

1.1 Posiadane dyplomy, stopnie naukowe

Stopień naukowy **doktora nauk technicznych** nadany 1 grudnia 1983 r. uchwałą Rady Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Tytuł rozprawy doktorskiej: Analiza współczynnika wzmocnienia gazowego w mieszaninach gazów i par w funkcji wybranych parametrów, promotor: Doc. dr Kazimierz W. Ostrowski, recenzenci: Prof. dr hab. Kazimierz Jeleń, Prof. dr hab. Andrzej Zastawny.

Stopień naukowy **magistra inżyniera elektryka w zakresie technicznej fizyki jądrowej z wyróżnieniem** nadany 29 września 1977 r. przez Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Tytuł pracy magisterskiej: Długożyciowe liczniki proporcjonalne promieniowania rentgenowskiego o energii do 6 keV wypełnione neonem, promotor: Doc. dr Kazimierz W. Ostrowski.

1.2 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

1977-1978

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Elektroniki, Międzyresortowy Instytut Fizyki i Techniki Jądrowej – asystent stażysta.

1978 – 1980

Środowiskowe Studia Doktoranckie UJ-AGH, studia stacjonarne.

1980 - 1983

Środowiskowe Studia Doktoranckie UJ-AGH, studia niestacjonarne.

1980 – 1993

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Elektroniki, Międzyresortowy Instytut Fizyki i Techniki Jądrowe – specjalista naukowo - techniczny.

1986 – 1987

European Space Research and Technology Center, ESTEC, Nordwijk aan Zee, Holandia, w ramach stypendium Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej w Wiedniu.

1993 – obecnie

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
adiunkt

2. Wskazanie osiągnięcia naukowego stanowiącego podstawę postępowania habilitacyjnego

Jako osiągnięcie naukowe w rozumieniu art. 16, ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.) przedstawiam cykl ośmiu powiązanych tematycznie publikacji pod wspólnym tytułem: **Mieszaniny robocze w detektorach gazowych stosowanych w eksperymentach fizyki wysokich energii i mikro-dozymetrii.**

2.1 Na cykl publikacji będących podstawą przewodu habilitacyjnego składają się następujące artykuły:

[H1] **T. Kowalski**, *Manifestation of the Penning effect in gas proportional counters*, Nuclear Instruments and Methods In Physics Research A 735(2014)528-531 (IF = 1,216). Jestem jedynym autorem pracy. Mój udział procentowy wynosi 100%.

[H2] Ö. Şahin, **T.Z. Kowalski**, R. Veenhof, *High-precision gas gain and energy transfer measurements in Ar-CO₂ mixtures*, Nuclear Instruments and Methods In Physics Research A 768(2014)104-111 (IF = 1,216).

Mój wkład w powstanie tej pracy polega na: opracowaniu koncepcji pracy, wykonaniu detektorów, napełnieniu ich mieszaniną o żądanym składzie, wykonaniu wszystkich prezentowanych pomiarów, wyznaczeniu wzmocnień gazowych, interpretacji otrzymanych wyników. Uczestniczyłem w przygotowaniu tekstu publikacji i w dyskusji z recenzentami. Mój udział procentowy szacuję na 51%.

[H3] Ö. Şahin, **T.Z. Kowalski**, R. Veenhof, *Systematic gas gain measurements and Penning energy transfer rates in Ne – CO₂ mixtures*, Journal of Instrumentation, 2016 JINST 11 P01003 (IF = 1,310 2015 rok).

Mój wkład w powstanie tej pracy polega na: opracowaniu koncepcji pracy, przygotowaniu detektorów do pomiarów, określeniu koncentracji czynnika gaszącego, napełnieniu detektorów mieszaniną o żądanym składzie i ciśnieniu, wykonaniu wszystkich prezentowanych pomiarów, wyznaczeniu wzmocnień gazowych, interpretacji otrzymanych wyników. Uczestniczyłem w przygotowaniu tekstu publikacji i w dyskusji z recenzentami. Mój udział procentowy szacuję na 60%.

[H4] Ö. Şahin, **T.Z. Kowalski**, *Measurements and calculations of elektron avalanche growth in ternary mixture of Ne – CO₂ – N₂*, Journal of Instrumentation, 2016 JINST 11 P11012 (IF = 1,310 rok 2015).

Mój wkład w powstanie tej pracy polega na: opracowaniu koncepcji pracy, wykonaniu wszystkich prezentowanych pomiarów, wyznaczeniu wzmocnień gazowych, interpretacji

otrzymanych wyników, wyznaczeniu stałych charakterystycznych dla mieszaniny. Przygotowałem tekst publikacji i prowadziłem dyskusję z recenzentami. Mój udział procentowy szacuję na 75%.

[H5] Ö. Şahin, **T.Z. Kowalski**, A comprehensive model of Penning energy transfers in Ar – CO₂ mixtures, *Journal of Instrumentation*, 2017 JINST 12 C01035 (IF = 1,310 rok 2015).

Mój udział powstaniu tej pracy polega na: pomiarze wzmocnień gazowych dla różnych koncentracji CO₂ i różnych ciśnień mieszaniny, modelowaniu transferu energii w efekcie Penninga, interpretacji fizycznej otrzymanych stałych, przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

[H6] **T.Z. Kowalski**, *Gas gain limitation in low pressure proportional counters filled with TEG mixtures*, *Journal of Instrumentation*, 2014 JINST 9 C12007 (IF = 1,399).

Jestem jedynym autorem pracy. Mój udział procentowy wynosi 100%.

[H7] **T.Z. Kowalski**, *Microdosimetric response of proportional counters filled with different tissue equivalent gas mixtures*, *Journal of Instrumentation*, 2015 JINST 10 C03006 (IF = 1,310).

Jestem jedynym autorem pracy. Mój udział procentowy wynosi 100%.

[H8] **T.Z. Kowalski**, *Gas gain limitation in low pressure proportional counters filled with TEG mixtures – part II*, *Journal of Instrumentation*, 2016 JINST 11 P01009 (IF = 1,310 2015 rok).

Jestem jedynym autorem pracy. Mój udział procentowy wynosi 100%.

[H9] **T.Z. Kowalski**, *Factors limiting the linearity of response of tissue equivalent proportional counters used in micro- and nano-dosimetry*, *Journal of Instrumentation*, 2017 JINST 12 C01075 (IF = 1,310 2015 rok).

Jestem jedynym autorem pracy. Mój udział procentowy wynosi 100%.

W pracach [H1] – [H5] zaprezentowano dwójakość podejścia do badania zjawisk fizycznych zachodzących w detektorach gazowych. Jedno można nazwać „podejściem analogowym”. Tworzymy model zjawisk fizycznych przy szeregu założeniach upraszczających. Otrzymujemy wzór na pierwszy współczynnik jonizacji Townsenda, α/p , i odpowiadającą mu formułę na wzmocnienie gazowe. W odpowiednim układzie współrzędnych wyniki pomiarów powinny układać się na linii prostej. Zakres liniowości określa przydatność danej formuły do opisu zjawisk fizycznych w detektorze. Na podstawie pomiarów możemy wyznaczyć pewne stałe, charakterystyczne dla danej mieszaniny, np. efektywny potencjał jonizacji, średnią wartość energii jaką elektron uzyskuje od pola pomiędzy kolejnymi zderzeniami jonizującymi, wartość natężenia pola przy której rozpoczyna się mnożenie lawinowe, średnią drogę swobodną jonizacji, promień strefy mnożenia lawinowego. Stałe te dają uśrednioną informację o zjawiskach w detektorze. Otrzymane formuły można zastosować do każdej mieszaniny i stwierdzić ich przydatność lub nie. Drugie podejście nazwałbym „podejściem cyfrowym”. Wykorzystując program MAGBOLTZ można prześledzić ruch pojedynczego elektronu w danej mieszaninie gazowej przy zadanym rozkładzie pola elektrycznego. Wymaga to jednak znajomości przekrojów czynnych na oddziaływanie elektronów z poszczególnymi składnikami gazu roboczego detektora. Obliczenia można wykonać tylko dla tych mieszanin dla których te przekroje są znane. W pracach [H1]- [H5] wyznaczono stałe charakterystyczne dla mieszanin korzystając zarówno z podejścia analogowego jak i cyfrowego. W przypadku wyznaczenia drugiego współczynnika jonizacji Townsenda, β , porównano wartości tak otrzymane [H4]. Są to dwie nawzajem uzupełniające się metody.

Liczniki gazowe są jednym z podstawowych typów detektorów stosowanych w mikro- i nano-dozymetrii. Od detektorów oczekujemy, zgodnie z zaleceniami ICRU, pomiaru dawki z dokładnością znacznie poniżej 5%. W parach [H6] – [H9] zaprezentowano czynniki ograniczające zastosowanie detektorów gazowych w mikro- i nano – dozymetrii. Czynniki wynikające z fizyki zjawisk zachodzących w detektorze, ograniczające minimalną i maksymalną mierzoną dawkę promieniowania, jak również limitujące rozmiar symulowanego przez detektor obiektu biologicznego.

2.2 Wprowadzenie

Wiele naszych wiadomości o naturze promieniowania jądrowego, o strukturze jądra atomowego, o elementach budowy materii, o naturalnych i sztucznych izotopach pierwiastków i możliwościach ich zastosowania, zawdzięczamy temu, że metody detekcji i liczenia pojedynczych cząstek, w latach następujących po odkryciu promieniotwórczości stawały się coraz dokładniejsze. Pojedyncze cząstki promieniowania jądrowego były obserwowane początkowo za pomocą metody scyntylicyjnej, która polegała na tym, że gdy cząstka α trafiała na kryształ np. blendy cynkowej lub diamentu, powstawał tak intensywny efekt świetlny, że można go było obserwować gołym okiem. Za pomocą tej metody można było stwierdzić obecność tylko cząstek α lub co najwyżej protonów, efekty świetlne pojedynczych elektronów były za słabe, aby można je zaobserwować w tak prosty sposób. Zastosowanie tej metody było uciążliwe i subiektywne, jednak dzięki niej uzyskano podstawowe wiadomości o istnieniu jądra atomowego. W 1908 r. Rutherford i Geiger opisali pierwszy gazowy licznik jonizacyjny dla cząstek α . Składał się on z cylindrycznej rurki metalowej, w której był umocowany osiowo cienki drut. Końce rurki były zamknięte, wewnątrz znajdowało się powietrze lub inny gaz pod niższym ciśnieniem. Pomiędzy cylindrem i drutem przyłożone było takie napięcie, że jeszcze nie zachodziło wyładowanie samoistne. Przy przejściu cząstek α przez cienkie okienko, równoległe do osi cylindra, powstawał prąd, który można było rejestrować. Wywołana przez cząstki α jonizacja pierwotna a gazie, wypełniającym rurkę, była wzmacniana około tysiąc razy. W modzie wzmocnienia gazowego wielkość impulsów była już wielokrotnie większa niż wielkość jonizacji pierwotnej ale wciąż proporcjonalna do niej. W zakresie geigerowskim już minimalna jonizacja pierwotna wytwarza wyładowanie, w którym wysokość impulsu już nie zależy od wielkości jonizacji pierwotnej. Szczególnie interesujący i nim się szczególnie zajęto to zakres proporcjonalny (zakres wzmocnienia gazowego) i zakres Geigera. Te dwa zakresy szczegółowo przebadano dla różnych mieszanin, ciśnień gazów roboczych i geometrii detektorów. Wykorzystano możliwość wykrywania neutronów za pomocą licznika z trófluorkiem boru przy równoczesnym występowaniu promieniowania β , γ , stosując zakres proporcjonalności licznika BF_3 . Liczniki napełniano początkowo czystymi gazami, np. gazami szlachetnymi, ale w tych licznikach wartości uzyskiwanych wzmocnień gazowych były niezbyt wysokie. Ogromnym postępem w technice liczników gazowych było stwierdzenie przez Trosta (1935), że dodatek do wypełniającego gazu kilku procent alkoholu istotnie zmienia własności licznika. Poprawiło to znacznie i energetyczną i czasową zdolność rozdzielczą. Trzeba było wielu lat pracy licznych badaczy aby przynajmniej nauczyć się rozumieć procesy zachodzące w licznikach. Zainteresowania zwróciły się głównie w kierunku liczników proporcjonalnych gdyż umożliwiają one nie tylko wykrywanie cząstek lecz również pozwalają wyznaczyć ich energię, gęstość jonizacji czy korelacje czasowe (pomiaru koincydencyjne).

Dla detektorów gazowych, szczególne znaczenie ma wypełniająca go mieszanina gazowa, to ona decyduje o jego własnościach i polach zastosowania.

2.2.1 Mieszaniny gazowe w eksperymentach fizyki wysokich energii

Trudne warunki pracy detektorów gazowych w eksperymentach fizyki wysokich energii stawiają wysokie wymagania i znaczne ograniczenia na wybór gazu roboczego:

- Gaz musi zapewniać wysoką wydajność rejestracji promieniowania, powyżej 95%;
- Gaz musi być szybki, aby zminimalizować nakładanie się impulsów w czasie, ładunki wygenerowane przez powstałe cząstki z poprzedniego i następnego zderzenia wiązek. Mieszanina gazowa musi zawierać najwyższą, możliwą koncentrację molekuł gazu szybkiego, takich jak CF_4 , O_2 , tak aby detektor mógł pracować przy częstościach rzędu MHz;
- Gaz musi zapewniać stabilną pracę detektora w szerokim zakresie napięcia zasilania, długi czas pracy detektora liczony wartością zebranego ładunku na jednostkę długości anody, np. 5C/cm, dla wysokich natężeń rejestrowanego promieniowania dochodzących do 200 kcps/(cm długości anody);
- Mieszanina gazowa powinna być niepalna, nietrująca, niewybuchowa, ekologiczna i jeżeli to możliwe to tania.

Jako gaz podstawowy najczęściej używany jest Ar, w detektorach promieniowania przejścia Xe. Dodanie do gazu głównego par CF_4 znacznie zwiększa szybkość mieszaniny, nie zapewniając jednak stabilnej pracy detektora. W tej mieszaninie wyładowania iskrowe są obserwowane. Należy dodać kolejny składnik zapewniający gaszenie. Może to być CO_2 , N_2 , DME lub inne pary związków organicznych. Najczęściej mieszaniny robocze są dwu- lub trójskładnikowe a sporadycznie czteroskładnikowe.

Czas zbierania ładunków jest krytycznym parametrem dla detektorów gazowych pracujących w eksperymentach fizyki wysokich energii. Jest on zdeterminowany przez prędkość dryfu elektronów, jej zależność od natężenia pola elektrycznego w detektorze i kierunku zewnętrznego pola magnetycznego. Detektory mogą być położone równolegle jak i prostopadle do linii sił pola magnetycznego. Obecność pola magnetycznego wydłuża czas zbierania ładunków a wielkość wydłużenia zależy od wzajemnej orientacji pól elektrycznego i magnetycznego. W praktyce, całkowity czas zbierania zależy od składowej prędkości dryfu równoległej do linii sił pola elektrycznego, którą trudno jest bezpośrednio zmierzyć, ale można policzyć z programu MAGBOLTZ. Składowa ta maleje gwałtownie w obecności pola magnetycznego, dla natężeń pól elektrycznych poniżej 4 kV/cm. Pola takie występują w detektorze w odległości większej niż 1 mm od osi anody. Nawet dla detektorów słomkowych o promieniu katody 2 mm, wpływ zewnętrznego pola magnetycznego jest znaczny. W eksperymentach HEP, w których mamy kilkaset tysięcy, czy nawet kilka milionów kanałów odczytu, koszt pojedynczego toru elektroniki odczytu jest istotny. Dążymy do tego aby detektory gazowe pracowały przy możliwie wysokim wzmocnieniu gazowym, aby uzyskać dobry stosunek sygnału do szumów. Umożliwia to również obniżenie kosztów odczytu pojedynczego kanału toru elektroniki co przy tak dużej ich ilości daje duże oszczędności. Wartość wzmocnienia gazowego limitowana jest planowanym czasem życia detektorów (wartością ładunku zebranego na jednostkę długości anody). Dla wyższych wartości wzmocnień gazowych, efekt ładunku przestrzennego w pojedynczej lawinie elektronowej jak i zjawiska wtórne opisane drugim współczynnikiem jonizacji Townsenda dają znaczną nieliniowość odpowiedzi detektora. W detektorach gazowych na podstawie powyższych obostrzeń ustalono zakres zmienności wzmocnienia gazowego od 10^4 do $7 \cdot 10^4$. Dolna wartość wynika z szumów torów odczytu a górna z nieliniowości odpowiedzi spowodowanej zjawiskami fizycznymi zachodzącymi w detektorze.

Pracy w modzie proporcjonalnym przy wysokich wzmocnieniach gazowych często towarzyszy wyładowanie w zakresie samogasnącego strimera (SQS-Self Quenching Streamer), których prawdopodobieństwo wystąpienia rośnie bardzo szybko ze wzrostem napięcia pracy detektora/(wzmocnienia gazowego). Ładunek generowany w wyładowaniu SQS jest ok. 10 razy większy od ładunku generowanego w modzie proporcjonalnym. Składowa szybka tego wyładowania ma amplitudę ok. (100-200) razy większą od analogicznej w wyładowaniu proporcjonalnym. Tak duże sygnały prowadzą do przeładowania elektroniki odczytu indukując czas martwy w przedwzmacniaczu.

Aby czas martwy toru pomiarowego był poniżej (1-2)%, prawdopodobieństwo wyładowania SQS powinno być poniżej 10^{-3} . Jest to kolejny czynnik ograniczający maksymalne wzmocnienie gazowe. Gdy robocze wzmocnienie gazowe jest już ustalone, należy wziąć pod uwagę czynniki, które mogą je zmienić, doprowadzając do degradacji parametrów całego detektora. Czynniki tymi mogą być zmiany ciśnienia atmosferycznego (w układach przepływowych ciśnienie gazu roboczego jest o kilka milibarów wyższe od ciśnienia atmosferycznego), gradienty temperatur w obszarze detektora, zmiana składu gazu roboczego. Zmiany ciśnienia i składu mieszaniny łatwo korygować poprzez zmiany napięcia zasilania, tak aby wzmocnienie gazowe było stałe. Kompensacja zmian temperatury często jest niemożliwa bo różne fragmenty detektora mogą mieć różną temperaturę.

Detektory rejestrują zarówno cząstki minimalnie jonizujące, deponujące ok. 3 keV/cm, jak i cząstki z kaskad hadronowych, które deponują energię kilka MeV/cm, a więc energię ok. 1000 razy większą od minimalnie jonizujących. Dla tak dużych depozytów energii liczniki pracują w modzie proporcjonalnym do wartości wzmocnienia gazowego ok. 100. Powyżej tej wartości pojawiają się iskrzenia.

Detektory pracują przy natężeniach promieniowania dochodzących do 15 MHz. Przy tak dużych strumieniach rejestrowanych cząstek obserwujemy zjawisko nazywane chwilowym/ przejściowym efektem starzenia. Powoduje on spadek amplitudy impulsu nawet o 10%. Efekt ten pojawia się bardzo szybko po rozpoczęciu naświetlania detektora i osiąga stan nasycenia w ciągu kilku minut. Chwilowy efekt starzenia wywołany jest poprzez wygenerowane w lawinie rodniki, fragmenty par gaszących, które zmieniają lokalnie skład gazu roboczego. Efekt ten ogranicza maksymalne natężenie rejestrowanego promieniowania i minimalną ilość wymian gazu w detektorze.

Czynnikiem istotnie wpływającym na stabilność pracy detektorów jest jakość ich wykonania, jakość użytego drutu anodowego, jakość powierzchni katody, centryczność umocowania drutu anodowego. Niekorzystne warunki środowiska pracy narzucają ostre wymagania detektorom gazowym co do mieszaniny roboczej jak i technologii wykonania.

2.2.2 Gazowe detektory śladowe w eksperymentach fizyki wysokich energii.

W eksperymentach fizyki cząstek wysokich energii (HEP) gazowe detektory śladowe znajdują szerokie zastosowanie. Stosowane są wielodrutowe komory proporcjonalne (MWPC – Multi Wire Proportional Chamber), komory dryfowe o różnej konstrukcji (DC – Drift Chamber), detektory słonkowe (ST – Straw Tube), komory z projekcją czasu (TPC – Time Projection Chamber) oraz komory z rezystywną katodą (RPC - Resistive Plate Chambers). Ich zastosowanie najlepiej pokazać na przykładzie aktualnie pracujących eksperymentów na akceleratorze LHC.

W eksperymencie CMS [1] do detekcji mionów w części centralnej wykorzystywane są **komory dryfowe o prostokątnym przekroju pojedynczej celi ($42 \times 13 \text{ mm}^2$)**, napełnione mieszaniną **85%Ar – 15%CO₂** o przestrzennej zdolności rozdzielczej $\sim 100 \mu\text{m}$, o 172000 kanałach odczytu. W częściach bocznych zastosowano 468 komór wielodrutowych z katodą paskową (CSC - Cathode Strip Chambers) dających 220000 kanałów odczytu z pasków katodowych i 180000 kanałów odczytu z drutów anodowych. Elementem systemu wyzwiania danych (Trigger) w tym eksperymencie są detektory z rezystywną katodą (RPC) o całkowitej powierzchni 2400 m².

W eksperymencie LHCb [2] zewnętrzny detektor śladowy (outer tracker) to układ gazowych **detektorów słonkowych o średnicy 4.9 mm**, wypełnionych mieszaniną **70%Ar – 30%CO₂**, o przestrzennej zdolności rozdzielczej $\sim 200 \mu\text{m}$ i o 55000 kanałach odczytu. Wewnętrzny układ śladowy to 12 komór potrójnych detektorów typu GEM (Gas Electron Multiplier) dających 2300 kanałów odczytu. System detekcji mionów to wielodrutowe komory proporcjonalne (o prostokątnym

przekroju) wypełnione mieszaniną 40%Ar- 55%CO₂-5%CF₄ dające 3*10⁶ kanałów odczytu o powierzchni całkowitej 435 m².

W eksperymencie TOTEM [3] zastosowano **wielodrutowe komory proporcjonalne z segmentowaną katodą (CSC)** (11100 kanałów odczytu anodowego, 16000 kanałów odczytu z pasków katodowych, mieszanina robocza to **50%AR – 50%CO₂**) i detektory typu **potrójny-GEM z 70%Ar – 30%CO₂** jako gazem roboczym.

W eksperymencie ALICE [4] głównym detektorem śladowym, wewnętrznym jest **komora dryfowa z projekcją czasu (TPC)** o objętości 90 m³, wypełniona mieszaniną **90%Ne – 10%CO₂ - 5%N₂**. Jako odczyt tej komory zastosowano wielodrutowe komory proporcjonalne z padową katodą. TPC ma 558000 kanałów elektroniki odczytu. Do separacji elektronów od mionów użyto komory dryfowej z odczytem w postaci komory wielodrutowej z padową katodą (1.2*10⁶ kanałów odczytu, 85%Xe-15%CO₂ mieszanina robocza, 27 m³ objętość gazu roboczego). Do identyfikacji cząstek metodą czasu przelotu zastosowano wiele -szczelinowe gazowe komory z rezystywną katodą (Multi-gap Resistive Plate Chambers) o powierzchni 171 m², objętości 17.5 m³ i 157000 kanałach odczytu. Detektor krotności fotonów to gazowe **liczniki proporcjonalne o geometrii plastra miodu** wypełnione mieszaniną **70%Ar-30%CO₂** i liczbie kanałów odczytu – 221000. W licznikach Cherenkova, w detektorach wetujących cząstki naładowane (Charge Particle Veto) i w spektrometrze mionów zastosowano **wielodrutowe komory proporcjonalne z padową katodą**, wypełnione odpowiednio CH₄, **80%Ar-20%CO₂**, dające kolejny milion kanałów odczytu, kolejne setki metrów kwadratowych powierzchni detektorów.

Jedną z komponent detektora wewnętrznego eksperymentu ATLAS [5] jest układ 350000 cylindrycznych liczników słomkowych o średnicy 4 mm, wypełnionych mieszaniną 70%Xe – 27%CO₂ – 3%O₂. Spełnia on podwójną rolę, daje średnio 36 punktów pomiarowych na torze cząstki i służy do identyfikacji elektronów. Układ detekcji mionów w ATLASie to komory precyzyjnego śladowania torów cząstek (MDT – Monitored Drift Tubes), wielodrutowe komory proporcjonalne z paskowymi katodami (CSC – Cathode Strip Chambers), komory z rezystywną katodą (RPC) i komory z cienką warstwą gazu (TGC – Thin Gap Chambers). **Komory precyzyjnego śladowania torów cząstek** są jedno anodowymi licznikami cylindrycznymi o średnicy 30 mm, wypełnione mieszaniną **93%Ar – 7%CO₂**, o ciśnieniu całkowitym 0,3 MPa i o powierzchni całkowitej 5500 m². Komory pracują przy wzmacnieniu gazowym ~ 2*10⁴, dają przestrzenną zdolność rozdzielczą ~ 80 μm. Ilość kanałów odczytu to 340000. W części przedniej detektora, dla pseudorapidity większej od 2, MDT zostały zastąpione przez **wielodrutowe komory proporcjonalne z paskowymi katodami** o przestrzennej zdolności rozdzielczej ~ 60 μm, napełnione mieszaniną **80%Ar – 20%CO₂**, pracujące przy wzmacnieniu gazowym 6*10⁴. Detektory z rezystywną katodą (RPC) są to gazowe detektory o płasko-równoległych elektrodach pracujące w modzie proporcjonalnym lub samo-gasnącego strimera. RPC w eksperymencie ATLAS to 14 m³ gazu roboczego. Komory z cienką warstwą gazu to wielodrutowe liczniki proporcjonalne charakteryzujące tym, że odległość między drutami anodowymi jest większa niż odległość między drutami anodowymi a płaszczyzną katody. Pracują w modzie quasi – nasycenia, przy wzmacnieniu gazowym ok. 3*10⁵, gaz roboczy to 55%CO₂ – 45%n-C₅H₁₂. Objętość tych komór wynosi 16 m³. Całkowita ilość kanałów odczytu z detektorów gazowych w eksperymencie ATLAS wynosi ok. 1.4*10⁶.

Powyżej wymieniono detektory gazowe stosowane w eksperymentach fizyki wysokich energii tylko na jednym akceleratorze. Różnorodność konstrukcji, detektory micro typu GEM, liczniki cylindryczne o średnicy 4 mm jak i 30 mm, cylindryczne i heksagonalne w przekroju (honeycombe), jedno- i wielo-anodowe, pracujące w modzie proporcjonalnym, w quasi-nasyceniu lub w modzie SQS,

liczba kanałów odczytu liczona w milionach świadczą o bardzo dobrej kondycji detektorów gazowych. We wszystkich eksperymentach stosowane są komory wielodrutowe o paskowych lub padowych katodach. Pod tą nazwą kryją się detektory o różnej grubości warstwy gazu, o różnej odległości pomiędzy drutami anodowymi, o różnej szerokości pasków katodowych i wymiarach padów jak również wypełnione różnymi mieszaninami gazowymi. Przestrzenna zdolność rozdzielcza detektorów gazowych nie jest tak dobra jak detektorów półprzewodnikowych ale dają znacznie więcej punktów pomiarowych na torze cząstki, nawet kilkadziesiąt. Stosowane są wszędzie tam, gdzie detektorami należy pokryć duże powierzchnie.

W powyższym tekście pogrubieniem zaznaczono detektory wypełnione mieszaninami, które badano w pracach H2, H3, H4 i H5..

2.2.3 Kolaboracja RD51 "Development of Micro-Pattern Gas Detector Technologies"

Zwieńczeniem prac nad detektorami gazowymi było przyznanie dla Prof. Georges Charpak Nagrody Nobla z Fizyki w 1992 roku za *"for his invention and development of particle detectors, in particular the multiwire proportional chamber"*. Opracowana przez Prof. G. Charpaka wielodrutowa komora proporcjonalna umożliwia pomiar dużych natężeń rejestrowanego promieniowania ($\sim 10^6$ cps), zapewniała przestrzenną zdolność rozdzielczą rzędu $\sim (300 - 400)$ μm ponadto informacja z komory była w postaci elektronicznej, gotowej do dalszej obróbki (z wcześniej stosowanych komór pęcherzykowych uzyskiwano zdjęcia torów cząstek, które należało skanować aby uzyskać użyteczną informację do dalszych obliczeń). Przez pewien czas wydawało się, że wraz z nagrodą Nobla i z odejściem Prof. G. Charpaka na emeryturę detektory gazowe również odejdą do lamusa.

Rozwój technologii fotolitografii, trawienia plastików i zapotrzebowanie ze strony użytkowników detektorów doprowadziły do opracowania detektorów gazowych typu mikro- MSGC [6] (MSGC – MicroStrip Gas Chamber), detektory z mikro siatką formującą pole elektryczne MICROMEGAS [7] (MICROMEGAS – Micro Mesh Gaseous Structure) czy powielacze elektronów GEM [8] (GEM – Gas Electron Multiplier). Detektory mikro- zapewniają wysokie wzmocnienie gazowe, wysoką wydajność detekcji, bardzo dobrą przestrzenną i energetyczną zdolność rozdzielczą, długi czas życia i możliwość pracy w bardzo wysokich strumieniach promieniowania.

Prace dotyczące rozwoju detektorów gazowych typu mikro- oraz klasycznych detektorów gazowych są prowadzone i koordynowane w ramach współpracy RD51 w CERN. Należy podkreślić, że kolaboracja RD51 powstała jako odpowiedź na zapotrzebowanie użytkowników detektorów, np. powielacz elektronów typu GEM został opracowany jako „koło ratunkowe” dla eksperymentu HERA B na akceleratorze HERA w ośrodku naukowym DESY w Hamburgu. Współpraca w dziedzinie badań i rozwoju RD51 ma na celu ułatwienie opracowywania zaawansowanych technologii wykonywania detektorów, badania ich własności a także projektowanie i rozwój powiązanych systemów elektronicznych odczytów, w zastosowaniach podstawowych i stosowanych. Opracowanie gazowych detektorów mikro paskowych (MPGD), gazowych powielaczy elektronów (GEM) czy detektora mikro siatkowego (MICROMEGAS) oferuje potencjalną możliwość przemysłowej budowy nowych typów detektorów gazowych, szczególnie interesujące jeżeli detektorami musimy pokryć dużą powierzchnię. Postępem w fizyce cząstek zawsze towarzyszył równoległy postęp w technologii wytwarzania detektorów promieniowania. Detekcja i obrazowanie promieniowania za pomocą niedrogich proporcjonalnych detektorów gazowych zdolnych pokryć duże powierzchnie, o małej gęstości powierzchniowej (low material budget) odgrywają ważną rolę w wielu dziedzinach. Poza szeroko rozpowszechnionymi zastosowaniami w fizyce cząstek i eksperymentach fizyki jądrowej, detektory gazowe są wykorzystywane w wielu innych dziedzinach: badaniach astro-cząstek i zastosowaniach, takich jak obrazowanie medyczne, materiałoznawstwo czy inspekcja bezpieczeństwa. Szeroko obecnie stosowane na LHC, RHIC i w innych zaawansowanych eksperymentach HEP, detektory gazowe (komory wielo drutowe, komory dryfowe, komory z rezystywną katodą) mają ograniczenia, które mogą uniemożliwić ich wykorzystanie w przyszłych eksperymentach. Detektory wykonane wg aktualnych standardów nie poradzą sobie z

oczekiwanym wysokim strumieniem cząstek, wysoką repetycją zderzeń i często nie zapewniają wymaganej przestrzennej zdolności rozdzielczej pojedynczego punktu pomiarowego. Możliwość produkcji mikrostrukturalnych urządzeń w których zachodzi wzmocnienie gazowe otwierają teraz możliwość budowy mnóstwa nowych typów detektorów i znacznie poszerzają pola ich zastosowań. Współpraca RD51 obejmuje około 450 autorów, 75 uniwersytetów i laboratoriów badawczych z 25 krajów w Europie, Ameryce, Azji i Afryce. W ramach współpracy ustalono wspólne cele, takie jak narzędzia eksperymentalne i symulacyjne, koncepcje i metody charakterystyki detektorów, wspólną infrastrukturę na wiązkach testowych i urządzeniach do napromieniania, a także metody i infrastrukturę produkcji detektorów typu mikro.

Kolaboracja RD51 rozpoczęła działalność w 2008 roku, grupa założycielska obejmowała 298 autorów z 57 uniwersytetów i laboratoriów badawczych. Aktualnie, jak już wspomniałem kolaboracja obejmuje 450 autorów (wzrost o 51%) i 75 uniwersytetów (wzrost o 32%). Na spotkaniu kolaboracji w lutym, 2017 do współpracy w ramach RD51 przyjęto dwie kolejne grupy z Uniwersytetu Mainz i z Instituto Gallego de Fisica de Altus, University of Santiago de Compostela. Kolaboracja intensywnie pracuje nad następną generacją detektorów gazowych i elektroniką ich odczytu, które sprostażą wymaganiom zmodernizowanego LHC.

Jestem aktywnym członkiem tej kolaboracji. Jestem współautorem szeregu wystąpień na spotkaniach roboczych (RD51 Mini-Week). Moje dane doświadczalne są podstawą do symulacji procesu rozwoju lawiny elektronowej w dowolnej geometrii detektora. Prace od H2 do H9 powstały w ramach tej współpracy.

2.3 Efekt Penninga

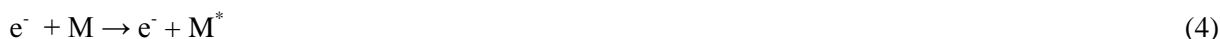
F.M. Penning [9] mierząc potencjał startowy wyładowania jarzeniowego w mieszaninie Ne + Ar zauważył znaczne jego obniżenie już dla koncentracji argonu poniżej 0,01%. W pomiarach, których celem było wyznaczenie dla cząstek α z polonu (5,298 MeV) absolutnej wartości średniej energii potrzebnej na wytworzenie pary jon-elektron, W , w mieszaninach He + Ar i Ne + Ar W.P. Jesse i J. Sadauskis [10] otrzymali znaczne obniżenie wartości W dla śladowych koncentracji argonu. Dla spektralnie czystego He otrzymali $W = 41,3$ eV/(para jonów) a dla He + 0,13% Ar tylko 29,7 eV/(para jonów), natomiast dla spektralnie czystego Ne i Ne + 0,12% Ar odpowiednio 36,3 i 26,1 eV/(ion pair). W czasie oddziaływania rejestrowanego promieniowania z mieszaniną gazową detektora oprócz jonizacji atomów mieszaniny mamy ich wzbudzenia do poziomów metastabilnych, M^m , albo do poziomów rezonansowych, M^* . Powrót wzbudzonych atomów gazu głównego mieszaniny do stanu podstawowego bez emisji fotonu może nastąpić wskutek zderzeń z atomami lub cząsteczkami domieszki, jeżeli energia stanów metastabilnych lub wzbudzonych jest wyższa niż potencjał jonizacji domieszki:



W efekcie Penninga produkcja dodatkowych elektronów następuje poprzez oddziaływanie atomów wzbudzonych do stanów metastabilnych z atomami domieszki, w efekcie Jessego wzbudzonych do poziomów optycznych (rezonansowych) [11, 12]. Aktualnie w literaturze oba procesy (1) i (2) są znane jako efekt Penninga odpowiednio na poziomach metastabilnych i rezonansowych [13, 14]. Efekt Penninga (Jessego) ma duży wpływ nie tylko na jonizację pierwotną ale również na rozwój lawiny elektronowej w zakresie licznika proporcjonalnego.

2.3.1 Rozwój lawiny elektronowej w mieszaninach gazów i par.

Wytworzone w procesie jonizacji pierwotnej elektrony podlegają dyfuzji oraz dryfowi w polu elektrycznym. Na skutek oddziaływania z polem rozkład energetyczny elektronów jest na tyle szeroki, że możliwe są zderzenia w których atom lub cząsteczka gazu będą wzbudzone do poziomów metastabilnych, M^m , poziomów rezonansowych, M^* , oraz będą jonizowane:



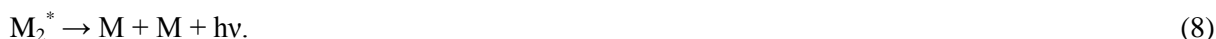
Atomy lub cząsteczki gazu wzbudzone do poziomów rezonansowych, M^* , mają krótki czas życia rzędu $\sim ns$ i po tym czasie ulegają de-ekscytacji do stanu podstawowego poprzez emisję fotonu:



Atomy w stanach metastabilnych, M^m , mają czas życia rzędu $\sim \mu s$. W tym czasie mogą w zderzeniach trójciałowych tworzyć tzw. excimery,



to jest wzbudzone cząsteczki, które wracając do stanu podstawowego emitują fotony o widmie ciągłym:



Powstały w procesie (5) wzbudzony jon ulega de-ekscytacji emitując foton lub przekazując energię wzbudzenia innemu atomowi:



Tak więc w strefie mnożenia lawinowego mamy elektrony, jony, fotony i wzbudzone atomy. Jeżeli gaz wypełniający detektor jest mieszaniną to dodatkowo może zachodzić proces (1) i jeżeli potencjał jonizacji domieszki B jest niższy od potencjału jonizacji atomu M to zawsze zajdzie proces (2). Ponadto fotony powstałe w procesach (6), (8) i (9) mogą jonizować czynnik B:



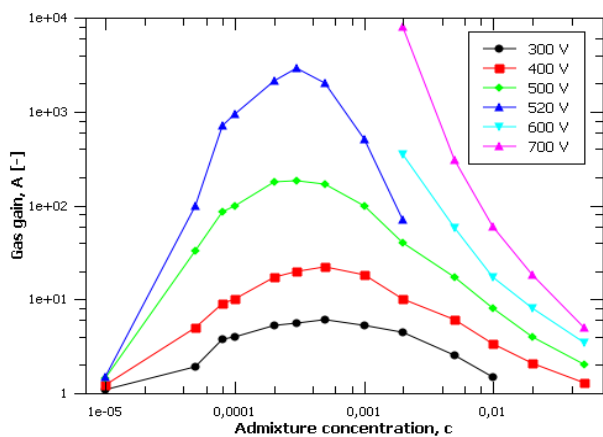
Podstawowy rozwój lawiny zachodzi poprzez jonizację zderzeniową (5). Procesy (1), (2) i (11) są źródłem dodatkowych elektronów modyfikujących proces wzmocnienia gazowego.

2.4 Omówienie prac składających się na cykl publikacji będących podstawą wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego.

2.4.1 Przejaw efektu Penninga na krzywych wzmocnienia gazowego.

Współczynnik wzmocnienia gazowego w zakresie od 1 do 8×10^3 został zmierzony dla mieszaniny Ar + izo-pentan, począwszy od spektralnie czystego argonu do 5% zawartości domieszki jako funkcja napięcia zasilania detektora, dla ciśnienia całkowitego mieszaniny 880 hPa. W pomiarach użyto cylindryczny, jedno anodowy licznik o średnicy katody $r_k = 14,5$ mm i średnicy anody $r_a = 50$ μm .

Detektor był podłączony do układu próżniowego, który umożliwiał szybkie jego odpompowanie i napełnienie mieszaniną o określonym składzie. Współczynnik wzmocnienia gazowego, A , wyznaczono metodą prądową, jako stosunek prądu I płynącego przez detektor przy danym napięciu zasilania detektora do prądu nasycenia, I_0 , w zakresie komory jonizacyjnej przy stałym natężeniu rejestrowanego promieniowania ($A = I/I_0$). ^{55}Fe (promieniowanie X o energii 5,9 keV) lub ^{90}Sr (promieniowanie β o energii maksymalnej 2,3 MeV) były wykorzystywane jako źródła promieniowania. Aby zminimalizować niepewność pomiaru prądu I_0 , w detektorze zainstalowano pierścienie ochronne. Wartość prądu I nie przekraczała 2 nA, aby wyeliminować efekt ładunku przestrzennego, który deformując pole elektryczne w detektorze zaniża zmierzone wartości wzmocnienia gazowego A . Niepewność pomiaru A jest limitowana niepewnością pomiaru prądu I_0 w zakresie komory jonizacyjnej i prądu I przy danym napięciu zasilania detektora. Oszacowano, że $\Delta I_0/I_0 \sim 2,5\%$ a $\Delta I/I \sim 2\%$. Zależność wzmocnienia gazowego od koncentracji izo-pentanu, przy stałym napięciu zasilania pokazano na rys. 1. Widoczne szerokie maksimum dla koncentracji domieszki, c , od 10^{-4} do 10^{-2} jest spowodowane generacją dodatkowych elektronów w procesie Penninga (1) w strefie wzmocnienia gazowego. Dla koncentracji domieszki $c \leq 5 \times 10^{-3}$ wzrost współczynnika wzmocnienia gazowego, A , spowodowany jest wzrostem wydajności procesu (1) natomiast obniżenie współczynnika A dla wyższych koncentracji spowodowane jest obniżeniem średniej energii elektronów w lawinie wraz ze wzrostem koncentracji czynnika gaszącego. Energie poziomów metastabilnych i rezonansowych argonu wynoszą, 11,55; 11,72; 11,62 i 11,83 eV, potencjał jonizacji izo-pentanu wynosi 10,45 eV, tak więc spełniony jest warunek energetyczny zajścia procesu (1)



Rys.1 Zależność współczynnika wzmocnienia gazowego, A , od koncentracji, c , izo-pentanu. Występowanie efektu Penninga objawia się szerokim maksimum. Koncentracja domieszki 10^{-5} oznacza spektralnie czysty argon [H1, 15].

2.4.2 Zależność efektywnego potencjału jonizacji od koncentracji czynnika gaszącego - przejaw efektu Penninga [H1].

Podstawową wielkością charakteryzującą rozwój lawiny elektronowej jest pierwszy współczynnik jonizacji Townsenda, α , obrazujący ilość par jon-elektron wygenerowanych przez elektron poruszający się w kierunku pola elektrycznego na jednostkę drogi. α zależy od rodzaju gazu, jego własności molekularnych i natężenia pola elektrycznego. Aoyama [14] na współczynnik α otrzymał:

$$\frac{\alpha}{p} = K S^m \exp(-L/S^{1-m}), \quad 0 \leq m \leq 1 \quad (p - \text{ciśnienie mieszaniny}) \quad (12)$$

i na wzmocnienie gazowe A :

$$\frac{\ln A}{p r_a S_a} = \frac{1}{1-m} \frac{1}{V_i} \exp(-L S_a^{m-1}), \quad (13)$$

gdzie K , L i m są stałymi charakterystycznymi dla danej mieszaniny gazowej, S_a jest wartością zredukowanego natężenia pola elektrycznego na powierzchni anody a V_i jest efektywnym potencjałem jonizacji. Zgodnie z Aoyamą $e \times V_i$ jest sumą uśrednionej w kierunku pola energii jaką elektron otrzymuje od pola elektrycznego na drodze λ_i pomiędzy dwoma kolejnymi zderzeniami jonizującymi i uśrednionej w kierunku pola energii początkowej elektronu ε_0 , wzór (14),

$$e \times \int_r^{r+\lambda_i} E dr + \varepsilon_0 = e \times V_i, \quad (14)$$

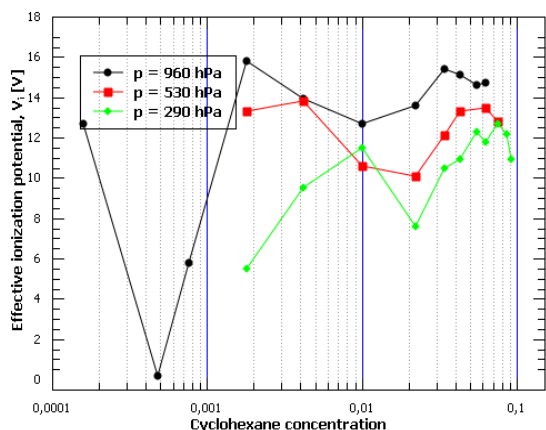
gdzie r jest dowolnym punktem w detektorze a E jest natężeniem pola elektrycznego. Równanie (13) może być zredukowane do zależności liniowej pomiędzy S_a^{m-1} i $\ln[\ln A / (p r_a S_a)]$ (równanie 15),

$$\ln\left(\frac{\ln A}{p r_a S_a}\right) = -L S_a^{m-1} - \ln D, \quad (D = (1-m) V_i). \quad (15)$$

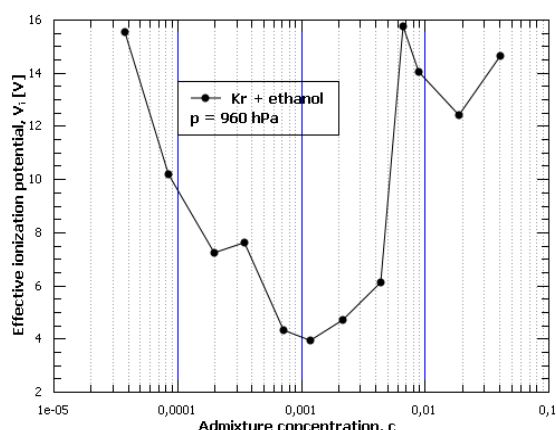
Formuła Aoyamy w rzeczywistości zawiera trzy nieznanne parametry L , D i m . Dla zmierzonych, eksperymentalnych wartości współczynnika wzmocnienia gazowego, A , używając metody najmniejszych kwadratów, dla wartości m z przedziału 0,05 do 0,95 w kroku co 0,01, wyznaczono wartości L i B . Wartości L , D i m dla których otrzymano najlepszy współczynnik korelacji uznano za stałe charakterystyczne dla danej mieszaniny. Wartości D przeliczono na V_i . Wartości V_i dla mieszanin Kr + cykloheksan, Kr + etanol i Kr + izopentan w funkcji koncentracji domieszki, c , pokazano na rysunkach 2 – 4. Wartości energii poziomów metastabilnych i rezonansowych kryptonu wynoszą odpowiednio: 9,915; 10,56 i 10,03; 10,64 eV a potencjały jonizacji domieszek odpowiednio: 10,3; 10,49 i 10,6 eV. Wartości potencjałów jonizacji tak dobrano aby procesy (1) i (2) mogły zachodzić tylko na niektórych poziomach wzbudzonych. Szerokie minimum w zależności V_i od c (rys. 2 i 3) dla koncentracji od 3×10^{-5} do 6×10^{-3} spowodowane jest procesem (1) natomiast zdecydowanie mniejsze ale dobrze widoczne (rys. 3 i 4) dla koncentracji czynnika domieszki $c \sim (2-3)\%$ spowodowane jest procesem (2). Stała czasowa, τ , zaniku liczby atomów wzbudzonych zależy od wielu czynników, wzór (16)

$$\tau^{-1} = k_1 p_M^2 + k_2 p_B^2 + k_3 p_M + k_4 p_B + k_5 p_M p_B + \tau_0^{-1}, \quad (16)$$

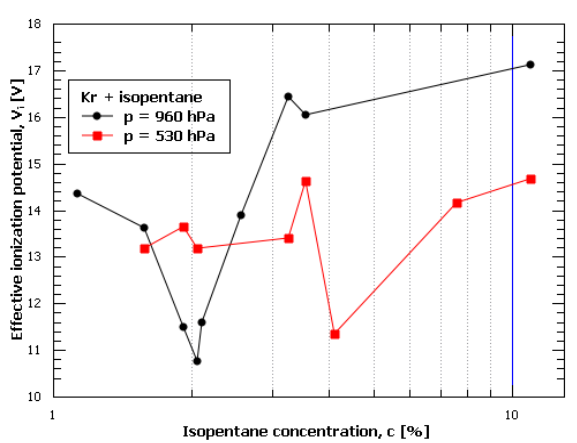
gdzie $k_1 - k_5$ są stałymi szybkości reakcji różnych procesów zderzeniowych, p_M i p_B są odpowiednio ciśnieniami parcjalnymi składnika M i B a τ_0 jest czasem życia poziomów wzbudzonych. Poziomy wzbudzone mogą odwzbudzać się zarówno w zderzeniach trójciałowych ($\sim p_M^2$, p_B^2 , $p_M \times p_B$) jak i dwuciałowych ($\sim p_M$, p_B) a efekt Penninga jest tylko jednym z możliwych kanałów, dlatego też minimum potencjału V_i jest funkcją rodzaju domieszki i ciśnienia mieszaniny.



Rys. 2 Zależność efektywnego potencjału jonizacji od koncentracji cykloheksanu dla różnych ciśnień mieszaniny. Położenie minimum dla $c \sim (1-3)\%$ jest proporcjonalne do $\sim 1/p$. Oznacza to, że czas życia poziomów rezonansowych nie zależy od ciśnienia mieszaniny. $V_i \sim 0$ dla $c \sim 4,8 \times 10^{-4}$ oznacza brak jonizacji zderzeniowej, proces (5), wzrost lawinowy elektronowej zachodzi tylko poprzez efekt Penninga, proces (1) [H1].



Rys. 3 Zależność efektywnego potencjału jonizacji od koncentracji etanolu. Ze względu na wartość potencjału jonizacji etanolu (10,49 eV), efekt Penninga zachodzi tylko dla jednego poziomu metastabilnego (10,56 eV) i jednego poziomu rezonansowego (10,64 eV) [H1].



Rys. 4 Zależność efektywnego potencjału jonizacji, V_i , od koncentracji czynnika gaszącego, izopentanu. Należy zauważyć, że występuje tylko jedno minimum przy koncentracji $c \sim (2-4)\%$, spowodowane procesem (2) [H1]. Efekt Penninga zachodzi tylko na stanie rezonansowym kryptonu o energii 10,64 eV.

2.4.3 Zależność α/p od koncentracji – przejaw efektu Penninga.

Zastawny [17] stwierdził, że wzmocnienie gazowe w postaci podanej przez wzór (17) jest tylko funkcją zredukowanego natężenia pola elektrycznego na powierzchni anody,

$$\frac{\ln A}{p r_a S_a} = \int_{S_0}^{S_a} \frac{\alpha}{p} \times \frac{dS}{S^2} = F(S_a). \quad (17)$$

Znając wymiary geometryczne licznika (r_a – promień anody i r_k – promień katody) i ciśnienie gazu wypełniającego licznik, p , możemy wyliczyć S_a i dokonując pomiaru zależności współczynnika

wzmocnienia gazowego A od napięcia przyłożonego między anodą i katodą możemy wyliczyć wartości funkcji $F(S_a)$.

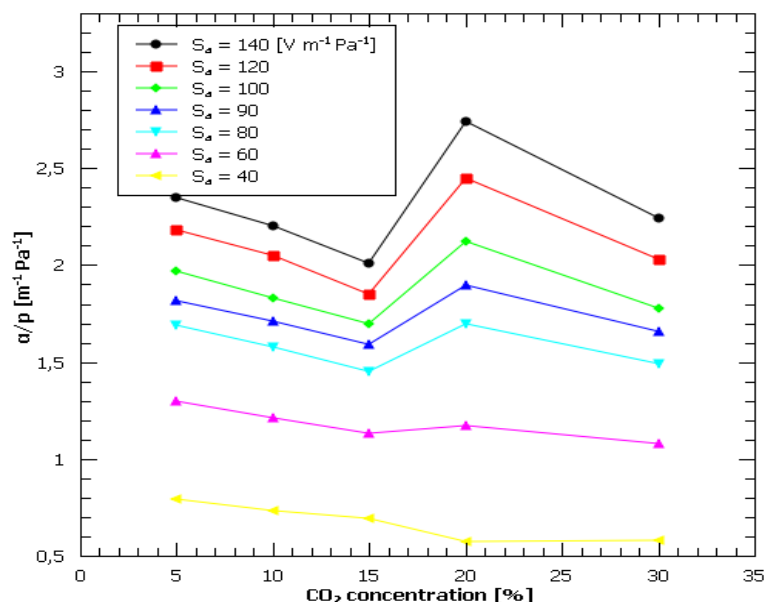
Townsend na pierwszy współczynnik jonizacji, α/p , otrzymał zależność

$$\frac{\alpha}{p} = C_1 \cdot e^{\frac{C_2}{S}}, \quad (18)$$

gdzie C_1 i C_2 to stałe charakterystyczne dla danej mieszaniny. Stosując wzór (18) na wzmocnienie gazowe otrzymujemy, wzór

$$\frac{\ln A}{p r_a S_a} = F(S_a) = \frac{C_1}{C_2} \times e^{\frac{C_2}{S_a}}. \quad (19)$$

Charakterystyczne stałe C_1 i C_2 wyznaczamy ze zmierzonych krzywych wzmocnienia gazowego. Mając wartości C_1 i C_2 ze wzoru (18) wyznaczamy α/p . Tak wyznaczony, zredukowany, pierwszy współczynnik jonizacji Townsenda, α/p , w funkcji koncentracji CO_2 pokazano na rys. 5.



Rys. 5 Zależność α/p w funkcji zawartości CO_2 w argonie. Parametrem krzywych jest zredukowana wartość natężenia pola elektrycznego na powierzchni anody. Potencjał jonizacji CO_2 wynosi 13,79 eV, w mieszaninie tej efekt Penninga (wzrost α/p dla koncentracji 20%) zachodzi na poziomach rezonansowych 3D o energiach 14,09 i 14,26 eV [H1].

2.4.4 Adiustacja pierwszego współczynnika jonizacji Townsenda uwzględniająca efekt Penninga w mieszaninie Ar – CO_2 [H2]

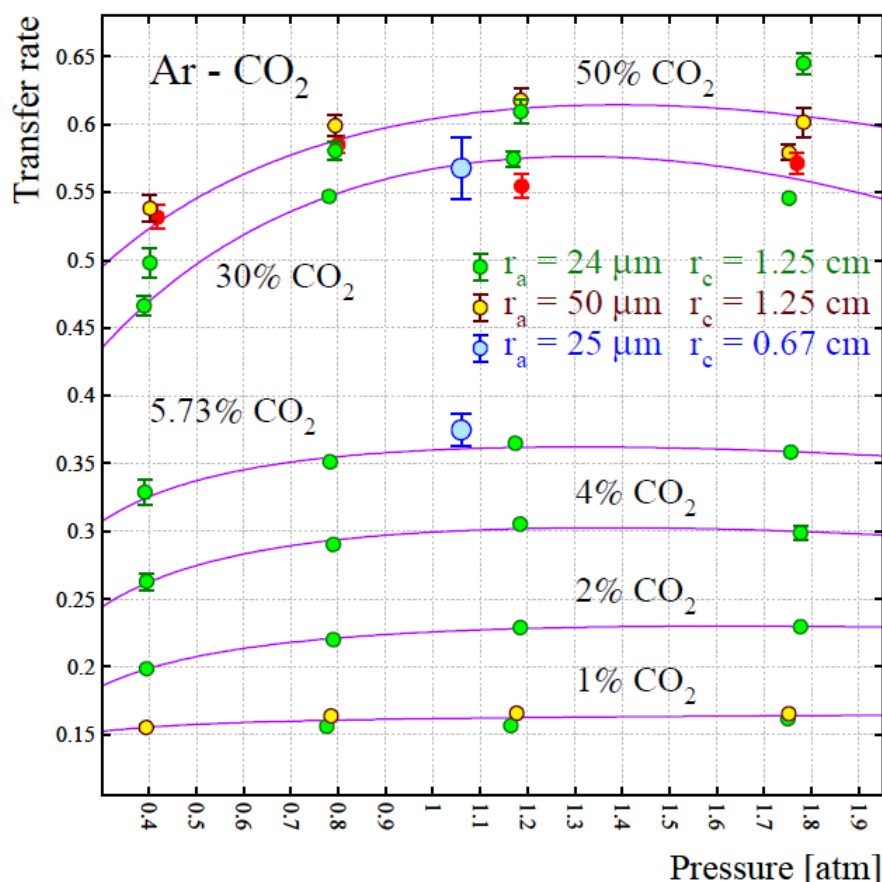
Wzmocnienie gazowe w liczniku jedno-anodowym uwzględniające efekt Penninga może być zapisane w postaci:

$$A = \exp \int_{r_m}^{r_a} \alpha_{pen} E(r) dr \quad (20)$$

gdzie r jest odległością od środka anody, r_m jest punktem w którym rozpoczyna się multiplikacja elektronów ($\alpha > 0$) i $E(r)$ jest funkcją rozkładu pola w detektorze. Adiustowany współczynnik jonizacji Townsenda α_{pen} jest zdefiniowany w następujący sposób [H2, H3, H4, H5]:

$$\alpha_{Pen} = \alpha \times \left(1 + r_{Pen} \frac{f_{Ar}^{exc}}{f_{mix}^{ion}}\right), \quad (21)$$

gdzie f_{mix}^{ion} jest szybkością jonizacji bezpośredniej (zderzeniowe) Ar^+ i CO_2^+ , f_{Ar}^{exc} jest szybkością wytwarzania stanów wzbudzonych argonu a r_{Pen} jest penningowską szybkością transferu (Penning transfer rate), prawdopodobieństwem, że wzbudzony argon zjonizuje molekulę CO_2 . W obliczeniach założono, że f_{mix}^{ion} jest proporcjonalny do α . Szybkość wytwarzania najniższych stanów wzbudzonych argonu ($3p^54s$) o energiach 11,55 eV (metastabilny), 11,62 eV (rezonansowy), 11,72 eV (metastabilny) i 11,83 eV (rezonansowy) w obliczeniach zostały pominięte ponieważ ich energia jest poniżej potencjału jonizacji CO_2 . Ponadto w obliczeniach założono tę samą wartość r_{Pen} dla wszystkich stanów wzbudzonych $3p^53d$ i wyższych (rys. 5). Wyznaczone wartości r_{Pen} w funkcji ciśnienia mieszaniny i w funkcji koncentracji CO_2 pokazano na rys. 6 i 7.



Rys. 6 Prawdopodobieństwo efektu Penninga uzyskane ze zmierzonych krzywych wzmocnienia gazowego jako funkcja ciśnienia całkowitego mieszaniny $Ar + CO_2$, parametry liczników podano na wykresie.

Jak widać z rys. 6 szybkość transferu energii, r_{Pen} , zawsze rośnie ze wzrostem koncentracji CO_2 przy stałym ciśnieniu mieszaniny. Jest to spowodowane skróceniem czasu pomiędzy zderzeniami wzbudzonych atomów argonu z molekułami czynnika gaszącego, CO_2 . Czas życia stanów wzbudzonych pozostaje stały a prawdopodobieństwo zderzenia z CO_2 rośnie ze wzrostem koncentracji domieszki. Zależność r_{Pen} od ciśnienia dla koncentracji 1% CO_2 i 2% CO_2 może być opisana funkcją dwuparametrową [H2],

$$r_{\text{Pen}}(p) = \frac{b_1 \times p}{p + b_2} \quad (22)$$

gdzie, $p_{\text{gas}} = p \times \text{atm}$, b_1 jest wartością asymptotyczną przy $p \rightarrow \infty$ a b_2 jest wydajnością zderzeniowego transferu energii ($\text{Ar}^* + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Ar} + \text{CO}_2^+ + e^-$). Dla koncentracji wyższych niż 2% CO_2 , r_{Pen} najpierw rośnie ze wzrostem ciśnienia osiągając maximum przy $p = 1200$ hPa aby niespodziewanie zmaleć dla najwyższego ciśnienia. Spadek wartości r_{Pen} wskazuje na inne kanały rozpadu Ar^* . Może to na przykład być formowanie wzbudzonych tzw. excimerów to jest wzbudzonych cząsteczek,



zwłaszcza, że prawdopodobieństwo procesu (23) jest proporcjonalne do $\sim p^2$. Excimery argonu mogą rozpadać się emitując fotony VUV,



Mogą również wzbudzać i jonizować atomy/molekuły domieszki, B,



Najwyższa energia stanów wzbudzonych excimerów argonu wynosi 11,3 eV [18]. Ze względu na wysoką wartość potencjału jonizacji CO_2 (13,77 eV), excimery argonu nie mogą zjonizować molekuł CO_2 ani poprzez fotony emitowane w procesie (24) ani w procesie (26). Skoro excimery powstają w zderzeniach trójciałowych [19, 20], proces (23) jest proporcjonalny do kwadratu ciśnienia mieszaniny. Dlatego formowanie Ar_2^* rośnie wraz ze wzrostem ciśnienia [21]. Uwzględniając stratę liczby atomów Ar^* w procesie (23), obniżenie wartości r_{Pen} dla wysokich ciśnień może być opisane poprzez dodanie do wzoru (22) czynnika proporcjonalnego do p^2 [H2],

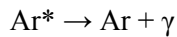
$$r_{\text{Pen}}(p) = \frac{b_1 \times p}{p + b_2} + b_3 \times p^2. \quad (27)$$

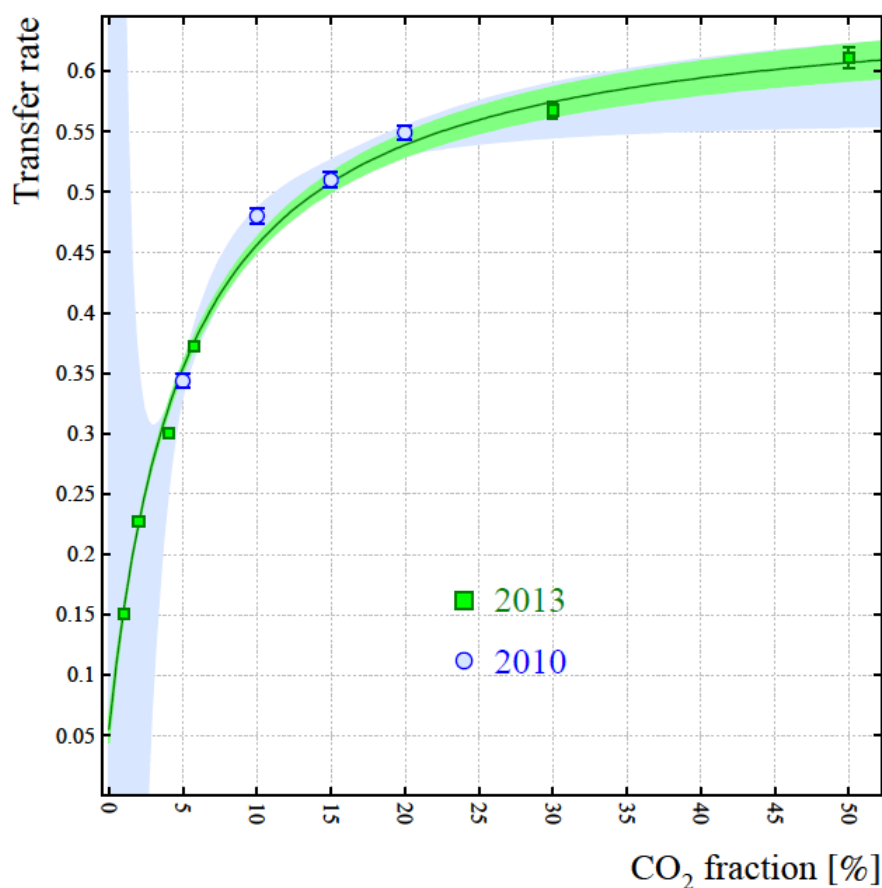
2.4.5 Szybkość transferu energii, r_{Pen} , w funkcji koncentracji CO_2 przy ciśnieniu atmosferycznym.

Zależność szybkości transferu energii w funkcji koncentracji CO_2 , pokazana na rys. 7 może być opisana funkcją,

$$r_{\text{Pen}}(c) = \frac{a_1 \times c + a_3}{c + a_2}, \quad (28)$$

a_1 jest wartością asymptotyczną szybkości transferu, stosunek a_3/a_2 daje prawdopodobieństwo jonizacji CO_2 przez fotony γ z rozpadu $\text{Ar } 3p^53d$ i wyższych stanów,





Rys. 7 Prawdopodobieństwo efektu Penninga, r_{Pen} , w mieszaninie Ar – CO₂ w funkcji koncentracji domieszki dla ciśnienia całkowitego mieszaniny $p = 1070$ hPa. Kolorem niebieskim (2010) zaznaczono wartości r_{Pen} wyznaczone w [22] na podstawie wyników zaprezentowanych w [23]. Kolorem zielonym (2013) zaznaczono r_{Pen} wyznaczone na podstawie moich dedykowanych pomiarów. Pola kolorowe oznaczają zakresy niepewności wyznaczenia r_{Pen} [H2].

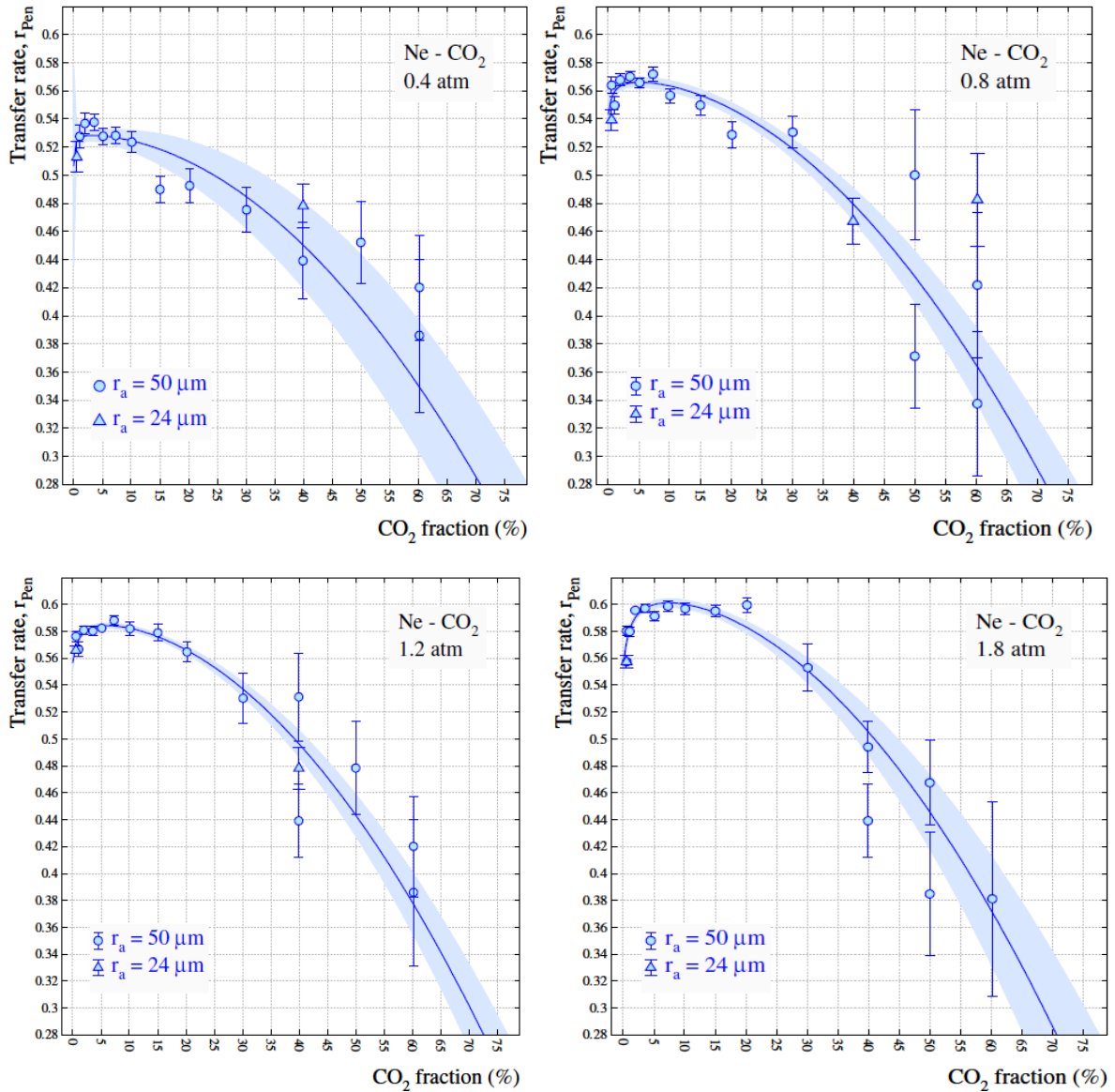
Ekstrapolacja krzywej z wykresu rys. 7 do $c = 0$ (czysty argon) na prawdopodobieństwo procesu (29) daje wartość $a_3/a_2 = 0,054$, dodatnią, co świadczy o poprawności funkcji (28).

Wszechstronny model transferu energii w efekcie Penninga w mieszaninie Ar-CO₂ uwzględniający zarówno zmiany koncentracji CO₂ jak i zmiany ciśnienia mieszaniny przedstawiono w [H5].

2.4.6 Efekt Penninga w mieszaninie Ne – CO₂ [H3]

Najniższy poziom wzbudzony neonu $2p^53s$ ma energię 16,619 eV a więc znacznie więcej niż wynosi potencjał jonizacji CO₂ (13,773 eV). Dlatego też wszystkie stany wzbudzone neonu mogą jonizować molekuły CO₂.

Szybkości transferu energii, r_{Pen} , dla mieszaniny Ne - CO₂ wyznaczone ze zmierzonych krzywych wzmocnienia gazowego, przy użyciu formuły (21) pokazano na rys. 8.

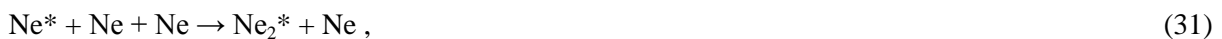


Rys. 8 Prawdopodobieństwo efektu Penninga, r_{Pen} , w mieszaninie Ne – CO₂ w funkcji koncentracji CO₂ dla różnych ciśnień mieszaniny odpowiednio 0,4; 0,8; 1,2 i 1,8 atm [H3, 24].

Należy zauważyć, że dla wszystkich ciśnień dla koncentracji domieszki poniżej 7,5%, r_{Pen} , rośnie ze wzrostem koncentracji, osiągając maksimum przy $c \sim (5 - 10)\%$. Dla wyższych koncentracji CO₂, r_{Pen} gwałtownie maleje. Ponadto r_{Pen} w maksimum, dla tej samej mieszaniny, ma mniejszą wartość dla niższego ciśnienia. r_{Pen} w funkcji koncentracji może być opisane zależnością [24],

$$r_{Pen}(c) = \frac{a_1 \times c + a_3}{c + a_2} - a_4 c^2 \quad (30)$$

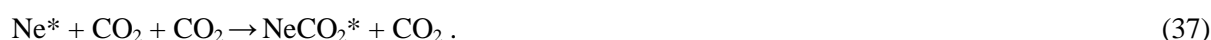
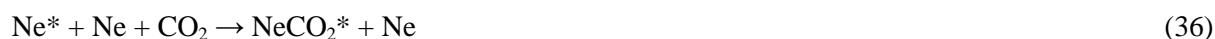
a_1 jest wartością asymptotyczną transferu energii, a_2 jest prawdopodobieństwem transferu energii w zderzeniu, $Ne^* + CO_2 \rightarrow Ne + CO_2^+ + e^-$, a_3/a_2 opisuje transfer radiacyjny i homojądrowy ($\gamma + CO_2 \rightarrow CO_2^+ + e^-$; $Ne^* + Ne \rightarrow Ne_2^+ + e^-$) a a_4 odpowiada za spadek wartości r_{Pen} przy wyższych koncentracjach CO₂. Możliwe są następujące procesy prowadzące do odwzbudzenia Ne^* ,





CO_2^* może ulec dysocjacji na neutralne fragmenty typu CO, O i C. Ze wzrostem koncentracji CO_2 prawdopodobieństwo procesu (31) maleje. Prawdopodobieństwo procesu (32) rośnie ale ze względu na mniejszą ilość ekscimerów wydajność procesu (32) maleje. Procesy (33) i (35) dostarczają dodatkowych elektronów. Dlatego też procesy (32) – (35) nie mogą powodować redukcji transferu energii, r_{Pen} , ze wzrostem koncentracji CO_2 .

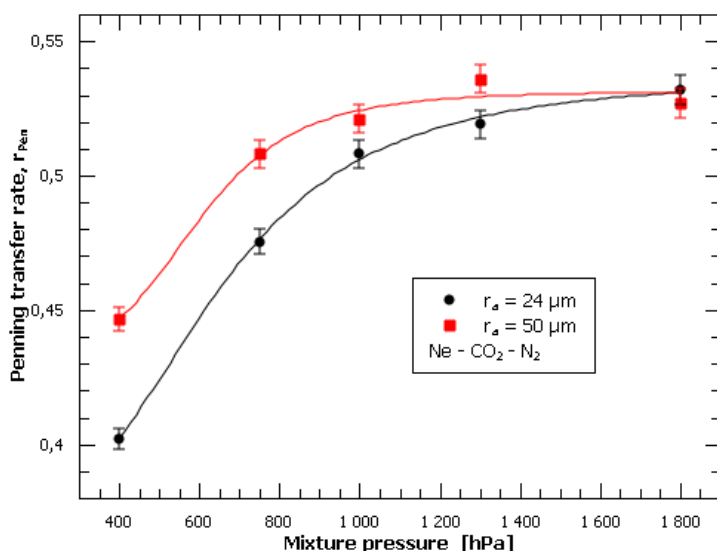
Następujące zderzenia trójciałowe mogą być odpowiedzialne za obniżenie r_{Pen} , przy wysokiej koncentracji CO_2 ,



Prawdopodobieństwo procesów (36) i (37) rośnie ze wzrostem koncentracji (ciśnienia parcjalego) CO_2 i de-ekscytacja Ne^* poprzez tworzenie kompleksów NeCO_2^* może wyjaśnić szybki spadek r_{Pen} , ze wzrostem koncentracji CO_2 .

2.4.7 Efekt Penninga w mieszaninie Ne – CO_2 – N_2 [H4]

Potencjał jonizacji N_2 wynosi 15,59 eV. W mieszaninie tej w efekcie Penninga mogą być jonizowane zarówno molekuly CO_2 jak i molekuly N_2 . Wyznaczone wartości r_{Pen} pokazano na rys. 9.

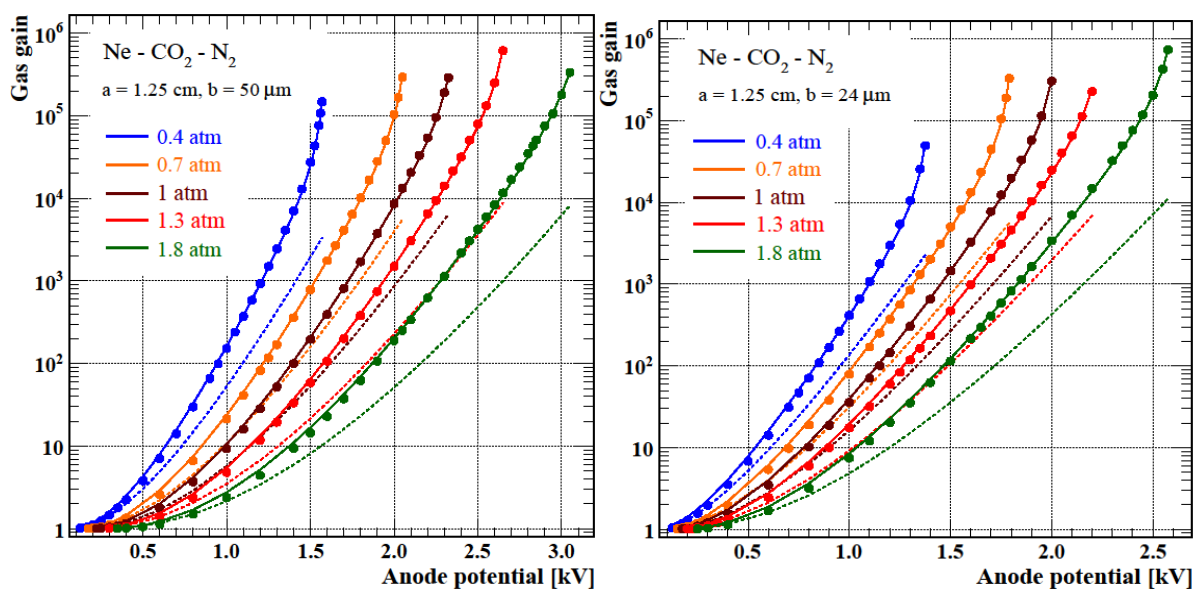


Rys. 9 Prawdopodobieństwo transferu energii w wyniku procesu Penninga wyznaczone ze zmierzonych krzywych wzmocnienia gazowego dla detektorów o różnych średnicach anod w funkcji ciśnienia całkowitego mieszaniny.

Jak widać z rys. 9, r_{Pen} rośnie ze wzrostem ciśnienia. Jest to zgodne ze zmniejszaniem się czasu pomiędzy zderzeniami wzbudzonych atomów neonu z molekułami CO_2 lub N_2 . Czas życia wzbudzonych atomów neonu pozostaje stały a gęstość molekuł CO_2 i N_2 rośnie, przez co zwiększa się szansa ich oddziaływania z molekułami domieszki.

2.4.8 Metoda analizy danych

Z dopasowania zmierzonych krzywych wzmocnienia gazowego otrzymujemy dwa parametry, prawdopodobieństwo transferu energii w procesie Penninga, r_{Pen} , i drugi współczynnik jonizacji Townsenda, β . Do obliczeń używany jest program Magboltz [25], który wykorzystując metody Monte Carlo symuluje transport elektronów w gazie rozwiązując równanie transportu Boltzmana. Program zawiera w sobie przekroje czynne na wzbudzenie, jonizację, przyklejanie elektronów, rozpraszanie elastyczne i nieelastyczne wraz z generatorem liczb losowych i śledzi ruch elektronów krok po kroku pod wpływem pola elektrycznego. Plik wejściowy programu zawiera rozkład pola elektrycznego i magnetycznego, ciśnienie i temperaturę mieszaniny gazu roboczego w detektorze, koncentrację każdego składnika mieszaniny. Plik wyjściowy zawiera wszystkie potrzebne do obliczeń wzmocnienia gazowego parametry transportu elektronów takie jak pierwszy współczynnik jonizacji Townsenda, α , szybkość generacji (produkcji) stanów wzbudzonych i jonizacji w polu elektrycznym o zmiennym natężeniu w zadanym przedziale zmienności natężenia pola. Szybkość wzbudzeń 44 różnych poziomów argonu może być policzona w stosowanej wersji Magboltz 9.0.1. Całkując numerycznie, policzony przez program Magboltz współczynnik jonizacji Townsenda, α , otrzymujemy symulowaną krzywą wzmocnienia gazowego. Porównując zmierzoną i obliczoną krzywą wzmocnienia gazowego, stosując nieliniową metodę najmniejszych kwadratów, zarówno r_{Pen} jak i β zostały wyznaczone. Przykład zmierzonych i policzonych krzywych wzmocnienia gazowego pokazano na rys. 10.



Rys. 10 Policzone i zmierzone krzywe wzmocnienia gazowego dla mieszaniny Ne-CO₂-N₂, 85-10-5, dla detektorów o różnym promieniu anody, b. Linie przerywane – policzone bez korekty, uwzględniono tylko jonizację zderzeniową. Linie ciągłe – uwzględniony transfer Penninga i współczynnik β . Punkty – dane pomiarowe, [H4].

2.5 Mieszaniny mikrodozymetryczne.

Idealny detektor, który można stosować w mikrodozymetrii do wyznaczania rozkładów dawek w obiektach biologicznych powinien spełniać szereg warunków:

- pomiar rozkładu energii przekazywanej przez promieniowanie powinien być mierzony w materiale z jakiego zbudowany jest obiekt biologiczny,
- detektor powinien móc wyznaczać rozkłady dawek w obiektach o różnej wielkości,

- odpowiedź detektora powinna być liniowa w całym zakresie przekazywanej energii, dotyczy to szczególnie pomiaru minimalnych i maksymalnych dawek,
- odpowiedź detektora powinna być niezależna od rodzaju promieniowania.

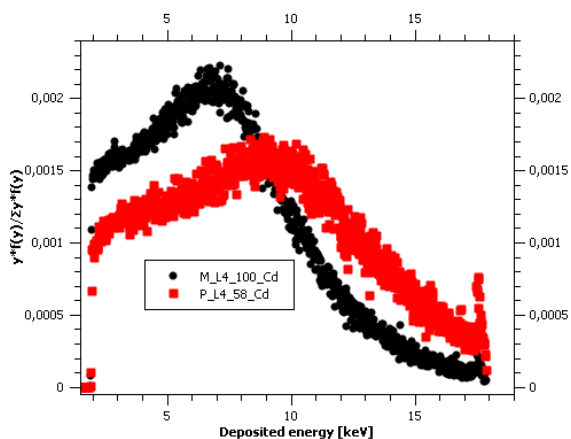
Materiały używane do konstrukcji liczników mikrodozymetrycznych oraz mieszanina je wypełniająca powinny spełniać szereg wymogów tkanko podobności. W literaturze można znaleźć szereg konstrukcji spełniających warunki tkanko podobności. Najczęściej w ich konstrukcji zwracana jest szczególna uwaga na rodzaj materiału, jego grubość a często pomijany jest aspekt „aby licznik proporcjonalny był proporcjonalny”. W pracach [H6] – [H9] zwrócono szczególną uwagę na procesy fizyczne zachodzące w detektorze w mieszaninach tkanko podobnych i ograniczenia w użyciu detektorów gazowych w mikrodozymetrii wynikające z mechanizmu ich pracy.

2.5.1 Mikrodozymetryczna odpowiedź liczników proporcjonalnych [H7].

Wielkość symulowanego przez detektor obiektu biologicznego można zmieniać poprzez zmianę wymiarów geometrycznych detektora lub zmianę ciśnienia mieszaniny wypełniającej detektor. W pomiarach odpowiedzi mikrodozymetrycznej detektorów wykorzystano cztery liczniki o różnych promieniach anod napełnione mieszaninami TEG (Tissue Equivalent Gas) na bazie metanu (64,4% CH₄ + 32,5% CO₂ + 3,1% N₂) i propanu (55,0% C₃H₈ + 39,6% CO₂ + 5,4% N₂). Odpowiedzi detektorów badano dla źródeł promieniowania: ⁹⁰Sr, ¹⁰⁹Cd i ¹³⁷Cs.

Odpowiedzi detektorów porównywano w trojaki sposób:

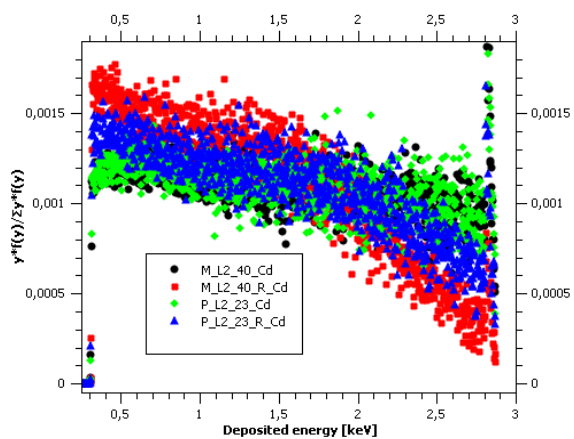
- dla tego samego detektora, dla tej samej wielkości symulowanego obiektu biologicznego (stałe ciśnienie mieszaniny) ale różnych rodzajów promieniowania (rys. 11);
- dla tego samego detektora, dla tego samego źródła promieniowania ale dla różnych wielkości biologicznego target, różnych ciśnień mieszaniny, (rys. 12);
- dla tego samego rodzaju promieniowania, tego samego ekwiwalentnego ciśnienia mieszanin ale różnych detektorów, wielkość symulowanego obiektu zmieniano poprzez zmianę średnicy licznika (rys.13).



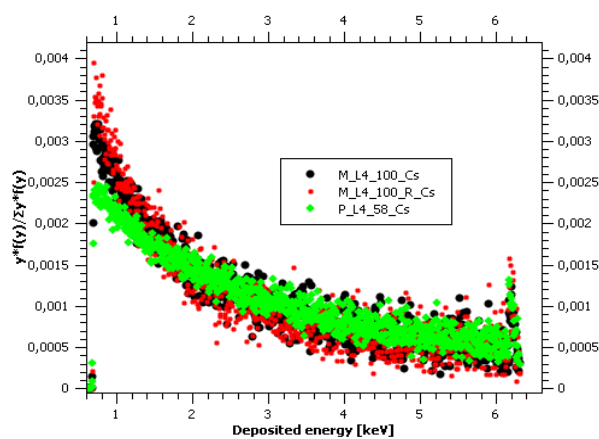
Rys.11 Rozkład dawki zdeponowanej ($y \cdot f(y) / \sum y \cdot f(y)$) w liczniku proporcjonalnym o średnicy 8mm napełnionych mieszaniną na bazie metanu, M, i propanu, P, dla ekwiwalentnych ciśnień (100 i 58 hPa) uwzględniających różnicę gęstości gazów, dla źródła ¹⁰⁹Cd. Średnica symulowanego obiektu biologicznego wynosi 1,01 μm. Maksyma depozytów dawek są wyraźnie przesunięte.

Analizując wszystkie otrzymane dane pomiarowe stwierdzono, że:

- Największą różnicę w odpowiedzi detektorów wypełnionych mieszaninami TEG zaobserwowano dla ciśnień mieszaniny ok. 100 hPa dla źródła promieniowania ¹⁰⁹Cd.
- Dla źródła ¹³⁷Cs tylko dla małych depozytów energii, poniżej 2 keV zaobserwowano różnice w kształcie widm, w odpowiedzi detektorów.
- Dla źródła ⁹⁰Sr uzyskano jednoznaczną funkcję odpowiedzi dla wszystkich liczników i napełnień.



Rys. 12 Rozkład dawki zdeponowanej ($y \cdot f(y) / \sum y \cdot f(y)$) w liczniku proporcjonalnym o średnicy 5,9 mm napełnionych mieszaniną na bazie metanu, M, i propanu, P, dla ekwiwalentnych ciśnień (40 i 23 hPa) uwzględniających różnicę gęstości gazów, dla źródła ^{109}Cd . Średnica symulowanego obiektu biologicznego wynosi $0,31 \mu\text{m}$. R – oznacza pomiar powtórzony. Należy zwrócić uwagę na idealną zgodność pomiarów.



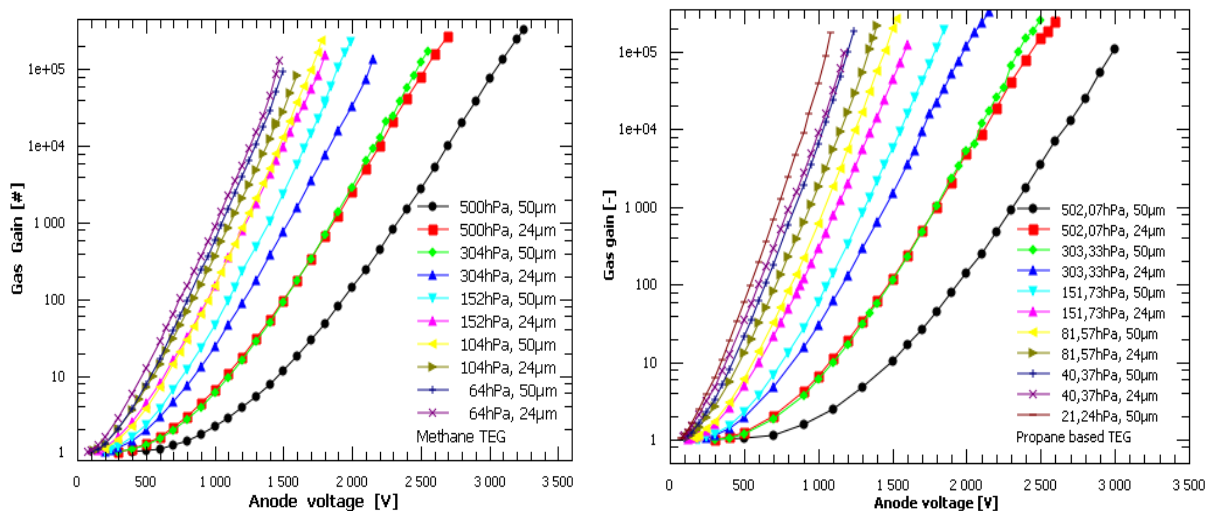
Rys. 13 Rozkład dawki zdeponowanej w liczniku proporcjonalnym o średnicy 8 mm, dla źródła ^{137}Cs . Średnica symulowanego obiektu biologicznego wynosi $0,76 \mu\text{m}$. Tylko dla najniższych depozytów energii widać różnice zdeponowanej dawki.

2.5.2 Ograniczenia współczynnika wzmocnienia gazowego w niskociśnieniowych licznikach proporcjonalnych wypełnionych mieszaninami tkankopodobnymi.

Liczniki tkankopodobne są powszechnie stosowane do monitorowania promieniowania szczególnie w mieszanych polach promieniowania. Na podstawie obserwacji radiobiologicznych zaobserwowano korelację pomiędzy rozkładem energii zaabsorbowanej w detektorze a efektami biologicznymi wywołanymi przez promieniowanie. Zjawiska związane ze zniszczeniami radiacyjnymi w obiektach biologicznych zachodzą w obszarach o wymiarach znacznie mniejszych od $1 \mu\text{m}$, prawdopodobnie o wymiarach kilku nanometrów. Stąd pojawia się potrzeba budowy liczników o nanometrowej średnicy symulowanej. Można to osiągnąć poprzez obniżenie ciśnienia mieszaniny w detektorze lub przez miniaturyzację detektora. Przy niskim ciśnieniu mieszaniny, lawinowe mnożenie elektronów rozpoczyna się w dużej odległości od powierzchni anody i nie można zaniedbać objętości strefy mnożenia lawinowego w porównaniu do objętości całego detektora. Przyjmuje się, że dolna granica symulowanej średnicy tkanki, poniżej której wyniki otrzymane przy użyciu gazowych detektorów proporcjonalnych o centymetrowych średnicach katod nie są już wiarygodne wynosi ok. $0,3 \mu\text{m}$. Miniaturyzacja wymiarów geometrycznych pozwala na stosowanie wyższych ciśnień mieszanin licznikowych i pomiary dla symulowanych średnic tkanki rzędu kilkudziesięciu nm. Ponadto ograniczeniem użycia detektorów gazowych do pomiaru skutków biologicznych oddziaływania promieniowania z materią jest fakt, że licznik proporcjonalny rejestruje tylko te oddziaływania w wyniku których powstają elektrony i jony a nie rejestruje tych oddziaływań w wyniku których powstają atomy/molekuły wzbudzone do wyższych poziomów energetycznych.

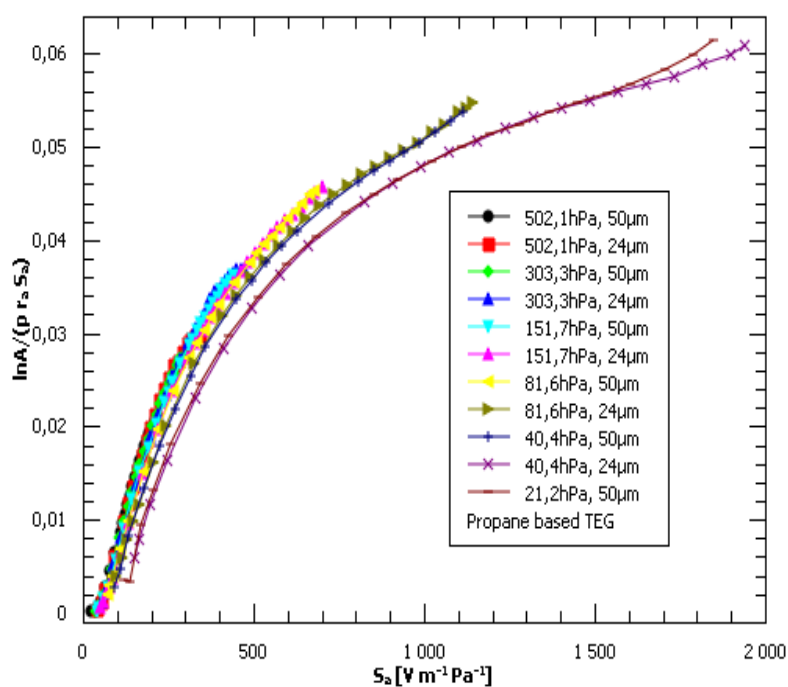
Wzmocnienia gazowe w mieszaninach TEG na bazie metanu i propanu o ciśnieniach od 20 hPa do 500 hPa (szczegóły na rys. 14 i 15) zmierzono w licznikach cylindrycznych o promieniu katody 25

mm i promieniu anody 100 μm i 48 μm . Zmierzone wartości współczynnika wzmocnienia gazowego, A, przedstawiono na rys. 14.



Rys. 14 Współczynnik wzmocnienia gazowego dla mieszanin TEG na bazie metanu i propanu w funkcji napięcia zasilania detektora. Ciśnienia mieszanin i promienie anod podano na rysunku, [H5].

Powyższe wyniki, można przedstawić w notacji zaproponowanej przez Zastawnego [26], wzór (17), na rys. 15.



Rys. 15 Krzywe wzmocnienia gazowego przedstawione w notacji Zastawnego, jako $\ln A / (p r_a S_a)$ w funkcji S_a . W tym układzie współrzędnych punkty pomiarowe dla różnych średnic anod i różnych ciśnień mieszaniny powinny układać się na jednej krzywej.

Z rys. 15 widać, że dla ciśnień mieszaniny poniżej 100 hPa i małej średnicy anody punkty pomiarowe nie leżą na jednej krzywej. Zmierzone wartości wzmocnień gazowych są za małe. Pomiędzy obszarem

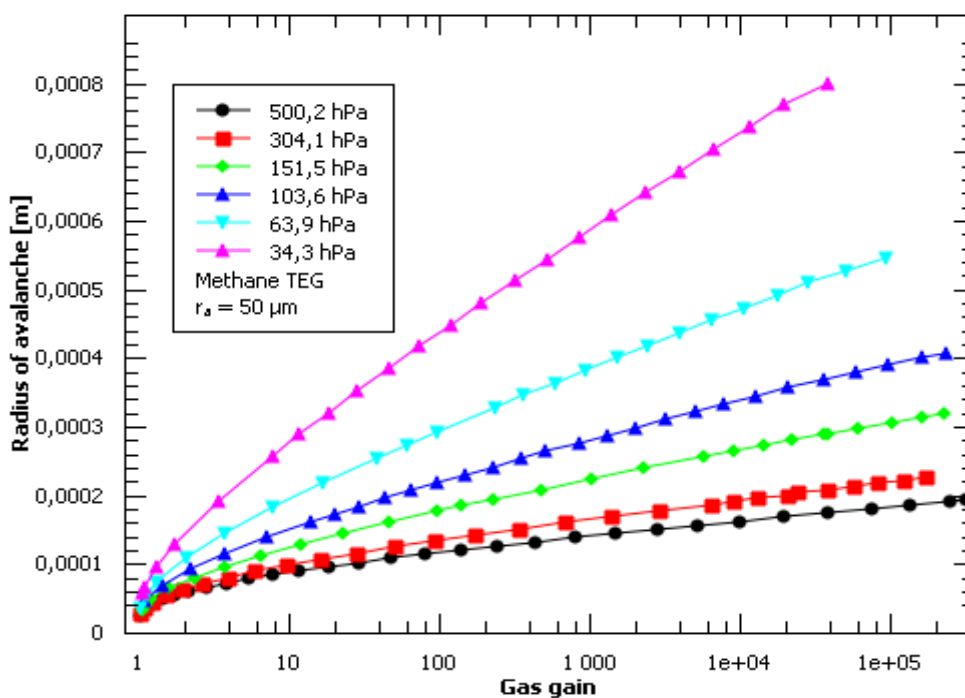
wzmocnienia gazowego a objętością dryfu elektronów w detektorze występuje obszar w którym natężenie pola jest takie, że elektron pomiędzy kolejnymi zderzeniami zyskuje wystarczająco energii aby wzbudzać ale za mało aby jonizować, w ten sposób redukcji ulega wymiar lawiny, zmniejsza się odległość od anody punktu w którym rozpoczyna się wzmocnienie gazowe. Ilość zderzeń w wyniku których atomy gazu przez elektrony pierwotne są wzbudzone rośnie wraz z obniżaniem ciśnienia gazu, objawia się to zbyt niskim wzmocnieniem gazowym dla niskich ciśnień mieszaniny. W mikrodozymetrii oznacza to, że dla tej samej zdeponowanej w detektorze energii promieniowania, zmierzona dawka zależy od wielkości symulowanego przez detektor obiektu biologicznego.

2.5.3 Promień lawiny elektronowej

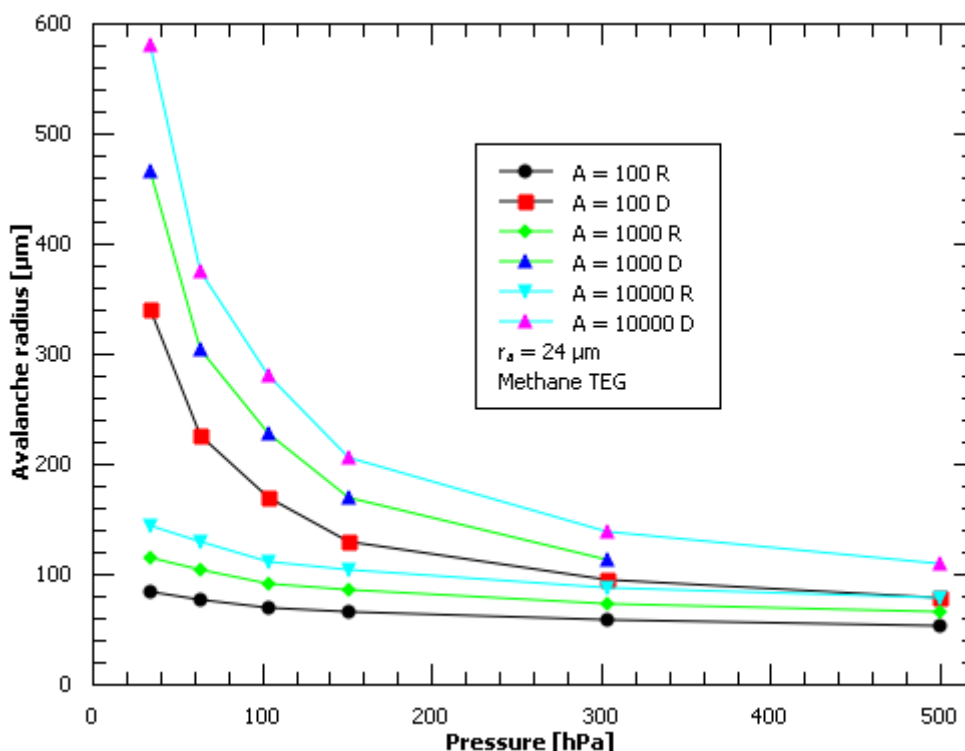
Diethorn [27] otrzymał następującą formułę łączącą wzmocnienie gazowe z parametrami opisującymi detektor i mieszaninę go wypełniającą:

$$\frac{\ln A}{p r_a S_a} = \frac{\ln 2}{\Delta E} \ln S_a - \frac{\ln 2}{\Delta E} \ln H, \quad (37)$$

gdzie ΔE i H są charakterystycznymi stałymi mieszaniny. ΔE jest średnią wartością energii kinetycznej jaką uzyskuje elektron od pola elektrycznego pomiędzy kolejnymi zderzeniami jonizującymi. H jest wartością zredukowanego natężenia pola elektrycznego przy której rozpoczyna się proces wzmocnienia gazowego. Punkty pomiarowe w układzie współrzędnych $\frac{\ln A}{p r_a S_a}$ vs $\ln S_a$ powinny układać się na linii prostej. Z wyznaczonego współczynnika kierunkowego i wyrazu wolnego tej prostej wyznaczamy ΔE i H . Używając formuły Diethorna i stałej H , wyznaczamy promień lawiny elektronowej zarówno w funkcji wzmocnienia gazowego, A , jak i ciśnienia mieszaniny przy stałym wzmocnieniu gazowym, rys. 16 i 17, odpowiednio. Dla ciśnień gazu roboczego $p \sim 500$ hPa stosunek objętości strefy wzmocnienia gazowego do objętości licznika jest rzędu $\sim 10^{-6}$, dla ciśnienia mieszaniny ok. ~ 30 hPa ten stosunek jest rzędu $\sim 10^{-3}$. Dalsze obniżanie ciśnienia, aby symulować obiekt biologiczny o mniejszej średnicy spowoduje utratę proporcjonalności odpowiedzi detektora.



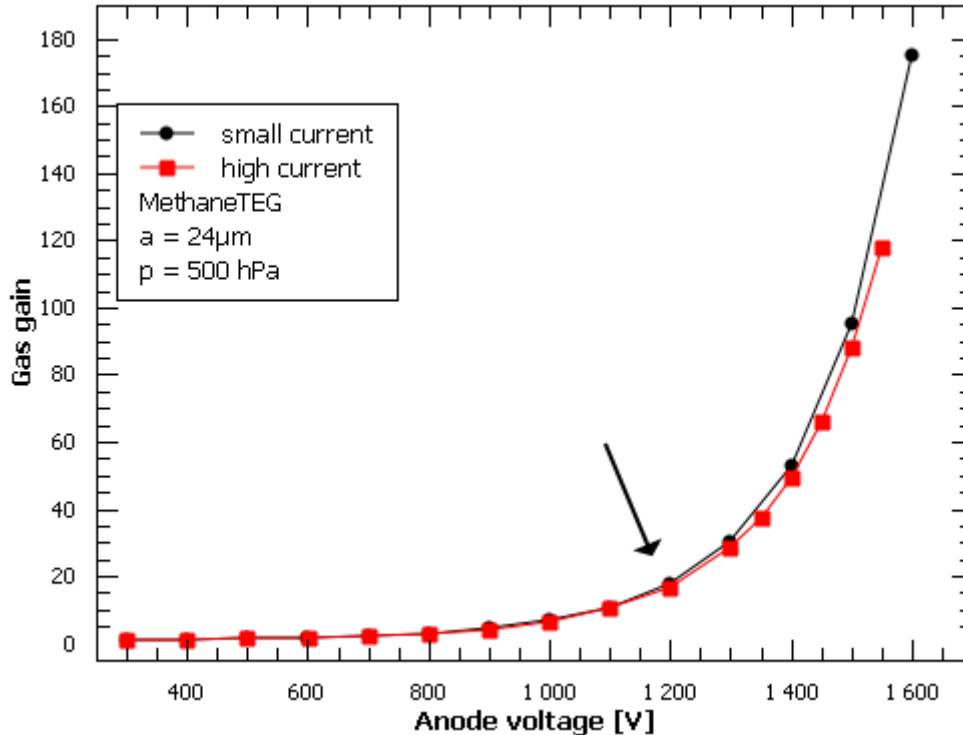
Rys. 16 Zależność promienia lawiny elektronowej w funkcji wzmocnienia gazowego dla różnych ciśnień całkowitych mieszaniny. Należy zwrócić uwagę na znaczny wzrost promienia lawiny elektronowej dla niskich ciśnień mieszaniny przy stałym wzmocnieniu gazowym.



Rys. 17 Zależność pełnego promienia lawiny od $A = 1$ (oznaczone literą D) i zredukowanego promienia lawiny elektronowej od $A = 2$ (oznaczone literą R) w funkcji ciśnienia mieszanki dla stałej wartości wzmocnienia gazowego. Należy zwrócić uwagę na znaczny wzrost strefy pośredniej pomiędzy obszarem dryfu elektronów a obszarem wzmocnienia gazowego dla niskich ciśnień gazu roboczego.

2.5.4 Praca detektorów przy wysokich natężeniach rejestrowanego promieniowania, liniowość odpowiedzi w funkcji dawki.

Obecność w obszarze mnożenia lawinowego powoli poruszających się jonów pochodzących z lawin od różnych aktów detekcji przy dużym natężeniu rejestrowanego promieniowania może deformować (obniżyć) pole elektryczne tuż przy anodzie, obniżając wartość wzmocnienia gazowego [28, 29, 30]. Zmierzone wzmocnienie gazowe dla prądów nie przekraczających wartości 2 nA i prądów przekraczających tę wartość. Wzmocnienie gazowe wyznaczono jako funkcję napięcia zasilania dla zmiennego natężenia rejestrowanego promieniowania i dla stałego, dużego natężenia promieniowania. Dla każdego natężenia promieniowania jest, wskazana na rys. 18 strzałką, wartość napięcia która dzieli zakres pracy detektora na dwa obszary [31, 32]. Dla napięć poniżej strzałki, wzmocnienie gazowe nie zależy od natężenia rejestrowanego promieniowania. Dla napięć powyżej strzałki obserwujemy efekt ładunku przestrzennego, który redukuje wartość wzmocnienia gazowego.



Rys. 18 Zależność wzmocnienia gazowego od napięcia zasilania detektora dla dużych i małych natężeń rejestrowanego promieniowania. Strzałką zaznaczono punkt w którym krzywe wzmocnienia gazowego rozchodzą się, rozpoczyna się proces deformacji pola przez jony dodatnie.

Prąd płynący przez detektor może być wyrażony przez poniższą formułę:

$$I = \frac{\Delta E}{W} \times A \times R \times e, \quad (38)$$

gdzie ΔE jest energią zdeponowaną przez rejestrowaną cząstkę w detektorze, W jest energią potrzebną na wytworzenie jednej pary jon-elektron, R jest częstością rejestrowanego promieniowania w cps a e jest ładunkiem elementarnym. Iloczyn $\Delta E \times R$ jest więc energią zdeponowaną przez promieniowanie w detektorze w ciągu jednej sekundy a więc jest to moc dawki, P .

Z równania (38) otrzymujemy:

$$P = \frac{I \times W}{A \times e}, \quad (39)$$

i

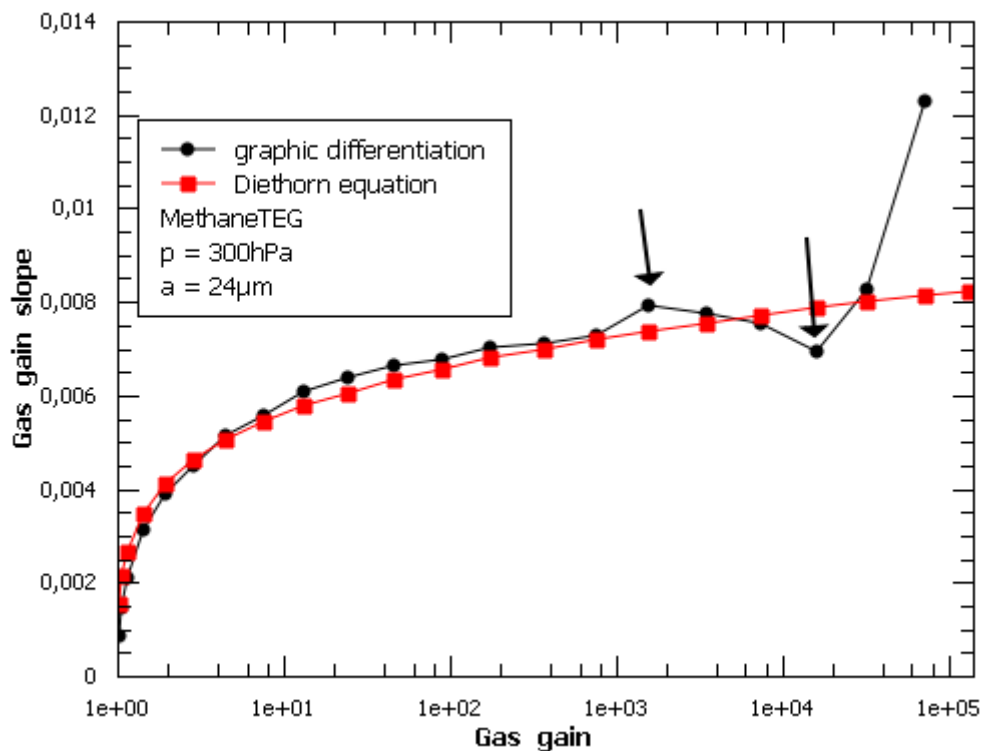
$$P_{max} = \frac{I_{cr} \times W}{A \times e} \quad (40)$$

gdzie I_{cr} jest wartością prądu powyżej którego obserwujemy 5% obniżenie wartości wzmocnienia gazowego a P_{max} jest maksymalną mierzalną dawką promieniowania. Swobodnym parametrem we wzorze (40) jest wzmocnienie gazowe, A .

2.5.5 Praca detektorów przy wysokich wzmocnieniach gazowych, liniowość odpowiedzi w funkcji wzmocnienia gazowego [H9].

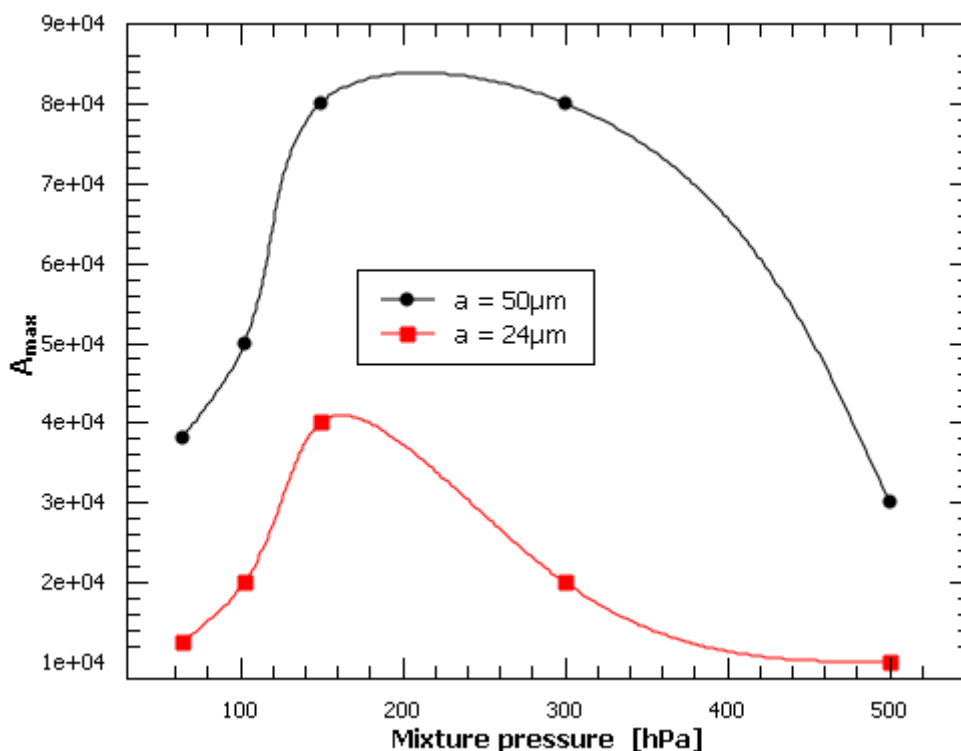
Aby uzyskać duży stosunek sygnału do szumów detektor powinien pracować przy wysokich wzmocnieniach gazowych. Należy jednak pamiętać, że praca przy wysokich wzmocnieniach gazowych może skutkować pogorszeniem energetycznej zdolności rozdzielczej detektora i obniżeniem wzmocnienia gazowego przez ładunek jonów wewnątrz pojedynczej lawiny (self induced space charge effect). Liniowość odpowiedzi detektora przy wysokich wzmocnieniach gazowych jest tracona. W

lawinie elektronowej są produkowane zarówno elektrony jak i jony. Elektrony szybko docierają do anody podczas gdy jony dodatnie powoli wędrują do katody. Jeżeli wzmocnienie gazowe jest wystarczająco wysokie, wygenerowane jony dodatnie w obrębie pojedynczej lawiny mogą deformować pole elektryczne w obrębie tej lawiny redukując wzmocnienie gazowe [32, 33, 34]. Efekt ten zależy od położenia toru jonizacji, jego inklinacji względem pola i długości oraz ciśnienia gazu roboczego. Wzmocnienie gazowe jest eksponentyjną funkcją napięcia zasilania detektora. Policzone nachylenie tej krzywej ($\Delta \ln A / \Delta U$), różniczkując graficznie zmierzoną krzywą wzmocnienia gazowego. Do zmierzonych krzywych wzmocnienia gazowego dopasowano również równanie Diethorna otrzymując funkcję analityczną opisującą zależność wzmocnienia gazowego od napięcia zasilania detektora. Tak otrzymaną funkcję zróżniczkowano. Przy wyprowadzeniu funkcji Diethorna pomijana jest deformacja pola elektrycznego przez ładunek przestrzenny w obszarze lawiny. Przykład tak otrzymanych nachyleń w funkcji wzmocnienia gazowego pokazano na rys. 19.



Rys. 19 Nachylenie krzywej wzmocnienia gazowego w funkcji wzmocnienia gazowego otrzymane poprzez różniczkowanie graficzne oraz z równania Diethorna. Obniżenie nachylenia wskazane przez strzałki spowodowane jest przez deformacje pola elektrycznego wewnątrz lawiny. Gwałtowny wzrost to efekt zjawisk wtórnych opisanych przez drugi współczynnik jonizacji Townsenda (powyżej drugiej strzałki).

Dla wzmocnień gazowych pomiędzy wartościami zaznaczonymi strzałkami obserwujemy obniżenie nachylenia krzywej wzmocnienia gazowego, saturacja wzmocnienia gazowego spowodowana jest deformacją pola w obszarze pojedynczej lawiny. Gwałtowny wzrost nachylenia powyżej górnej strzałki to efekt zjawisk wtórnych opisanych przez drugi współczynnik jonizacji Townsenda [14, 34]. Tak więc maksymalne wzmocnienia gazowe, A_{max} , w detektorze są ograniczane albo przez deformację pola wewnątrz lawiny albo przez zjawiska wtórne. Zależność A_{max} od ciśnienia mieszaniny pokazano na rys. 20. Dla wysokich ciśnień A_{max} jest ograniczone przez efekt ładunku przestrzennego w pojedynczej lawinie, dla niskich ciśnień mieszaniny przez zjawiska wtórne a dla ciśnień pośrednich oba efekty są widoczne. Znajomość A_{max} jest niezbędna aby określić minimalną, mierzalną, zdeponowaną w detektorze energię promieniowania.



Rys. 20 Zależność A_{\max} od ciśnienia mieszaniny dla mieszaniny tkanko podobnej na bazie metanu.

2.6 Podsumowanie

Zagadnieniem łączącym prace [H1 – H9] są zjawiska fizyczne zachodzące w detektorach gazowych, znajomość których jest niezbędna aby określić ich przydatność w eksperymentach fizyki wysokich energii i dozimetrii. Znajomość zjawisk fizycznych pozwala na określenie ograniczeń w zastosowaniu detektorów gazowych.

Do najważniejszych osiągnięć zawartych w [H1 – H9] zaliczam:

- Pomiar krzywych wzmocnienia gazowego dla mieszanin Ar + CO₂, Ne + CO₂, Ne + CO₂ + N₂ w szerokim zakresie zmian koncentracji czynnika gaszącego i szerokim zakresie ciśnień mieszanin.
- Pomiar krzywych wzmocnienia gazowego dla mieszanin tkanko podobnych na bazie metanu i propanu w szerokim zakresie zmian ciśnienia mieszaniny a więc w szerokim zakresie zmian średnicy symulowanego biologicznego targetu.
- Wyznaczenie prawdopodobieństwa transferu energii w efekcie Penninga, r_{Pen} , w funkcji ciśnienia mieszaniny i koncentracji czynnika gaszącego.
- Stworzenie kompleksowego modelu transferu energii w efekcie Penninga obejmującego zmienność r_{Pen} w funkcji koncentracji czynnika gaszącego i w funkcji ciśnienia całkowitego mieszaniny.
- Wyznaczenie drugiego współczynnika jonizacji Townsenda i stworzenie modelu zjawisk wtórnych dla powyższych mieszanin.
- Wartości wzmocnień gazowych zmierzone i wyliczone z użyciem programu MAGBOLTZ idealnie zgadzają się, co oznacza, że zaproponowane modele są poprawne.
- Do analizy własności mieszanin użyto zarówno formuł analogowych (wzory Diethorna, Aoyamy i Williama i Sary) opisujących proces wzmocnienia gazowego jak i metody wykorzystujące Monte

Carlo do symulacji transportu elektronów w gazie, są to dwa komplementarne podejścia, po raz pierwszy równocześnie zastosowane.

- Dla badanych mieszanin wyznaczono podstawowe parametry charakteryzujące wzrost lawiny elektronowej, α/p – pierwszy współczynnik jonizacji Townsenda, ΔE – przyrost energii elektronów pomiędzy kolejnymi zderzeniami jonizującymi, H – zredukowaną wartość natężenia pola elektrycznego przy której rozpoczyna się multiplikacja elektronów, V_i – efektywny potencjał jonizacji, promień lawiny elektronowej i jego zależność od wzmocnienia gazowego i ciśnienia gazu roboczego.
- Dla mieszaniny tkanko podobnej na bazie metanu wyznaczono górny limit mierzonej dawki i jego zależność od ciśnienia mieszaniny oraz maksymalne wzmocnienia gazowe limitujące minimalną mierzoną energię zdeponowaną w detektorze.
- Wykazano, że odpowiedzi detektorów napełnionych różnymi mieszaninami tkanko podobnymi różnią się tylko dla niskich depozytów energii w symulowanym obiekcie biologicznym.

Wielkości te wyznaczono dla detektora jedno anodowego o geometrii cylindrycznej ale wyznaczone stałe mogą i są stosowane w symulacjach rozwoju lawin w innych geometriach np. dla detektorów typu GEM lub MicroMegas.

Literatura

1. CMS Collaboration, *The CMS experiment at the CERN LHC*, 2008 JINST 3 S08004.
2. The LHCb Collaboration, *The LHCb Detector at the LHC*, 2008 JINST 3 S08005.
3. The TOTEM Collaboration, *The TOTEM Experiment at the CERN Large Hadron Collider*, 2008 JINST 3 S08007.
4. The ALICE Collaboration, *The ALICE experiment at the CERN LHC*, 2008 JINST 3 S08002.
5. ATLAS Collaboration, *The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider*, 2008 JINST 3 S08003.
6. A. Oed, *Position-sensitive detector with micro strip anode for elektron multiplication with gases*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A263(1988)351-359.
7. Y. Giomataris, Ph. Rebourgeard, J.P. Robert, **G. Charpak**, *MICROMEAS: a high-granularity position-sensitive gaseous detector for high particle-flux environments*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A376(1996)29-35.
8. F. Sauli, *GEM: A New concept for elektron amplification in gas detectors*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A386(1997)531-534.
9. F. M. Penning, *The starting potential of the glow discharge in neon argon mixtures between large parallel plates: II. Discussion of the ionization and excitation by electrons and metastable atoms*, Physica 1(1934) 1028-1044.
10. W.P. Jesse, J. Sadauskis, *Alpha-Particle Ionization In Mixtures of the Noble gases*, Phys. Rev. 88(1952)417.

11. W. Blum, L. Rolandi, *Particle Detection with Drift Chambers*, Springer- Verlag Berlin Heidelberg 1993.
12. M. Inokuti, *Introduction to the Symposium on the Jesse Effect and Related Phenomena*, Radiation Research 59(1974)343.
13. **T.Z. Kowalski**, J. Zając, *Concentration dependence of effective ionization potential in Penning mixtures*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res A249(1986)426.
14. **T.Z. Kowalski**, K.W. Ostrowski and J. Zając, *Concentration dependence of elektron avalanche growth in Krypton+cyclohexane mixtures*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res A250(1986)550.
15. K. Jeleń, *Lawinowe mnożenie elektronów w mieszaninach gazów i par*, Kraków 1980, Zeszyty Naukowe Akademii Górniczo-Hutniczej im Stanisława Staszica, Nr 786.
16. T. Aoyama, *Generalized gas gain formula for proportional counters*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res A 234(1985)125.
T.Z. Kowalski, *On the generalized gas gain formula for proportional counters*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A244(1986)533-536.
17. A. Zastawny, *Standardization of gas amplification description in proportional counters*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 385(1997)239.
18. M.J. Druyvesteyn, F.M. Penning, *The Mechanism of Electrical Discharges in Gases of low Pressures*, Rev. Of Modern Physics 12(1940)87.
19. T. Oka, et al., *Energy transfer of argon excited diatomic molecules*, The Journal of Chemical Physics 70(7)(1979)3384.
20. W. Wieme, J. Lenaerts, *Excimer formation in argon, krypton and xenon discharge afterglows between 200 and 400 K*, Journal of Chemical Physics 74(1981)483.
21. J. Wieser, et al., *Vacuum ultraiolet rare gas excimer light source*, Review of Scientific Instruments 68(1997)1360.
22. Ö. Şahin, **T. Kowalski**, *Recent gain calculation*, MPGD 2013 & 12th RD51 Collaboration Meeting 14– 17 October 2013, CERN,
<https://indico.cern.ch/conferenceOtherViews.py?view=standard&confId=267513>
23. **T.Z. Kowalski**, A.R. Stopczyński, *The gas gain process In Ar/CO₂ filled proportional tubes*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A323(1992)289.
24. Ö. Şahin, **T. Kowalski**, *Status of gas gain measurements and calculations in Ne + CO₂ mixtures*, 3rd Academy-Industry Matching Event on Photon Detection and RD51 Mini-Week , 8– 12 June 2015, CERN, *Ozkan_RD51_CERN_8_12_June_2015.pdf*.
25. F. Biagi. Magboltz 9. <http://magboltz.web.cern.ch/magboltz>.
S. Biagi. Magboltz - *Transport of electrons in gas mixture*, online at <http://cern.ch/magboltz>.

- S.F. Biagi, *Monte Carlo simulation of elektron drift and diffusion In counting gases under the influence of electric and magnetic fields*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A421(1999) 1-2, 234-240.
26. A. Zastawny, *Standardization of gas amplification description In proportional counters*, Nucl. Instr. and Meth in Phys. Res. A385(1997)239.
 27. W. Diethorn, *A methane proportional counter systems for natural radiocarbon measurements*, AEC, Oak Ridge Tennessee (1956) [NYO-6628].
 28. R.W. Hendricks, *Space charge effects in proportional counters*, Rev. Sci. Instrum. 40(1969)1216.
 29. J. Sernicki, *Local space charge effect in conventional avalanche counters at moderate specific ionization*, Nukleonika 45(2000)125.
 30. K. Ketagiri, T. Furukawa, E. Takeshito i K. Noda, *Numerical analysis of the space charge effect in a MWPC*, J. Plasma Fusion Res. 9(2010)614.
 31. S. Koperny i **T.Z. Kowalski**, *Performance of proportional counters under high count rate, high gas gain and at high working gas pressure*, Nucl. Phys. Proc. Suppl. B 197(2009)370.
 32. S. Koperny i **T.Z. Kowalski**, *Operation of proportional counters under high gas gain, high working gas pressure in mixed field of radiation*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 718(2013)575.
 33. C. Mori, M. Uno i T. Watanabe, *Self-induced space charge effect on gas gain in proportional counters*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. 196(1982)49.
 34. Ö. Şahin, I. Tapan i R. Veenhof, *Secondary avalanches in gas mixtures*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 718(2013)432.

3. Wykaz osiągnięć naukowo badawczych

3.1 Przed doktoratem (lata 1977 – 1983)

Pracę dyplomową (promotor doc. Dr Kazimierz W. Ostrowski) pod tytułem „Długożyciowe liczniki proporcjonalne promieniowania rentgenowskiego o energii do 6 keV wypełnione neonem” obroniłem z wyróżnieniem w 1977 roku. Pracę wykonałem w Samodzielnej Pracowni Detektorów Instytutu Fizyki i Techniki Jądrowej. Od tej pory jestem związany z tą Pracownią, ze względu na zmiany struktury organizacyjnej Instytutu, powstanie Wydziału, aktualnie pracownia ta jest częścią Katedry Oddziaływań i Detekcji Cząstek Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH. Aktywnie uczestniczyłem w pracach prowadzonych w Samodzielnej Pracowni Detektorów dotyczących opracowania nowych konstrukcji detektorów:

- Liczniki osiowe – czołowe,
- Liczniki z okienkiem mikowym, aluminiowanym do pomiaru niskoenergetycznego promieniowania X dla astrofizyki (program INTERKOSMOS),
- Liczniki typu „pill-box” dla spektrometrów fluorescencji rentgenowskiej.
- Liczniki pudełkowe, boczno-okienkowe do analizy fluorescencyjnej zawartości miedzi na różnych etapach flotacji (badania zamówione przez Ośrodek Naukowo-Badawczy Cuprum)
- Liczniki Geigera – Muellera do badania pęków promieniowania kosmicznego (badania zamówione przez Uniwersytet Rolniczo-Techniczny w Siedlcach).
- Liczniki pudełkowe o wypełnieniu na bazie kryptonu dla badań efektu Mossbauera (badania zamówione przez POLON)

Prace dotyczyły nie tylko konstrukcji mechanicznej detektora ale również odpowiedniego doboru wypełniającej go mieszaniny gazowej. W tym celu prowadziłem pomiary energetycznej zdolności rozdzielczej, wzmocnienia gazowego, efektu częstościowego i temperaturowego dla liczników proporcjonalnych napełnionych neonem, argonem i kryptonem jako gazami głównymi z różnymi czynnikami gaszącymi.

3.1.1 Spis publikacji i raportów z tego okresu.

1. B. Bednarek, W. Jagustyn, K. Jeleń, **T. Kowalski**, K.W. Ostrowski, E. Rulikowska i T. Zabagło, *Nowe rozwiązania liczników proporcjonalnych promieni X do zastosowań przemysłowych*, *Symposium RWPG nt zastosowań metod radioizotopowych w przemyśle łącznie ze środkami kontroli i sterowania*, Lipsk 1979.
2. B. Bednarek, K. Jeleń, **T. Kowalski**, K.W. Ostrowski, E. Rulikowska-Zarębska, *Liczniki proporcjonalne do detekcji promieniowania X w zakresie energii 1,3 – 100 keV*, XXVI Zjazd Fizyków Polskich, Toruń 1979.
3. B. Bednarek, K. Jeleń, **T. Kowalski**, K.W. Ostrowski, E. Rulikowska-Zarebska, *Detektory promieniowania X*, Materiały Konferencji Fizyka dla Przemysłu, Kraków 1980.
4. **T.Z. Kowalski**, *The gas amplification factor in Kr + isopentane filled proportional counters*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. 216(1983)447.
5. B. Bednarek, W. Jagusztyn, K. Jeleń, **T.Z. Kowalski**, K.W. Ostrowski, E. Rulikowska-Zarębska, P. Turkowski, J. Zajac, *Some problems in the development of proportional counters for X-ray fluorescence analysis*, Materiały Konferencji DET'84, Warszawa 1984, Raport INT 188/I, Kraków 1984.
6. B. Bednarek, K. Jeleń, **T.Z. Kowalski**, K.W. Ostrowski, E. Rulikowska-Zarebska, J. Zajac, *Liczniki proporcjonalne i Geigera-Muellera dla zastosowań w radiometrii przemysłowej*, materiały Konferencji Fizyka dla Przemysłu, Gdańsk 1984.
7. **T.Z. Kowalski**, E. Rulikowska-Zarębska, *Studies of elektron avalanche multiplication In non-equilibrium weakly ionized gases with Kr as a main gas*, 7th ESCAMPING, Bari, Italy, 1984, page 74.8.
8. B. Bednarek, K. Jeleń, **T. Kowalski**, K.W. Ostrowski, E. Rulikowska-Zarębska, J. Zajac, *Miniaturnyje proporcjonalnyje scziotcziki dlja dietiektrowanija izluczenija X w diapazonie energii ot 1,3 keV do 50 keV*, Nauczpriyor SEV'84, Plovdiv, Bułgaria, 1984. Streszczenie w języku polskim ukazało się w AND 5,12(1984).
9. B. Bednarek, W. Jagusztyn, K. Jeleń, **T. Kowalski**, K. Ostrowski, E. Rulikowska-zarebska, P. Turkowski, J. Zajac, *Wybrane zagadnienia z dziedziny rentgenowskich liczników proporcjonalnych do analizy fluorescencyjnej*, Instytut Fizyki i Techniki Jądrowej AGH Raport INT 188/I.

3.2 Wykaz osiągnięć naukowych po doktoracie w latach 1984-1986.

Różni autorzy próbowali na drodze teoretycznej wyznaczyć zależność współczynnika wzmocnienia gazowego od napięcia pracy detektora, jego geometrii i rodzaju wypełniającego go gazu. Wymaga to znajomości funkcji opisującej α/p od zredukowanego natężenia pola na anodzie, E/p . Zakładając, że ładunek przestrzenny jonów dodatnich nie deformuje rozkładu pola elektrycznego w strefie mnożenia gazowego, zjawiska dyfuzji i rekombinacji nośników ładunku oraz zjawiska wtórne opisane przez drugi współczynnik jonizacji Townsenda można pominąć, czyniąc jeszcze dodatkowe założenia upraszczające różni autorzy otrzymali różne wzory na α/p w funkcji E/p a więc i różne wzory na

wzmocnienie gazowe. Otrzymano dziesięć różnych wzorów, w tym dwa otrzymane przeze mnie. Każda z tych formuł zawiera dwie lub trzy stałe, które dla danej mieszaniny można wyznaczyć doświadczalnie. Stałe te są powiązane ze zjawiskami mikroskopowymi zachodzącymi w detektorze. Przedstawiając wzmacnienie gazowe w odpowiednim układzie współrzędnych można określić zakres wzmożeń gazowych (zredukowanego pola elektrycznego) w zakresie którego daną formułę można stosować. Wyznaczone stałe są charakterystyczne dla danej mieszaniny i mówią nam o przebiegu zjawisk fizycznych zachodzących w liczniku, oczywiście są to informacje uśrednione, np. średni przyrost energii elektronu pomiędzy kolejnymi zderzeniami jonizującymi. W tym okresie mojej kariery naukowej (1984-1986) zajmowałem się pomiarem krzywych wzmożenia gazowego i wyznaczaniem z nich charakterystycznych stałych dla mieszanin licznikowych, ich zależności od koncentracji domieszki i ciśnienia całkowitego mieszaniny. Otrzymane rezultaty zawarto w poniższych publikacjach.

3.2.2 Spis publikacji i raportów z tego okresu (1984 – 1986)

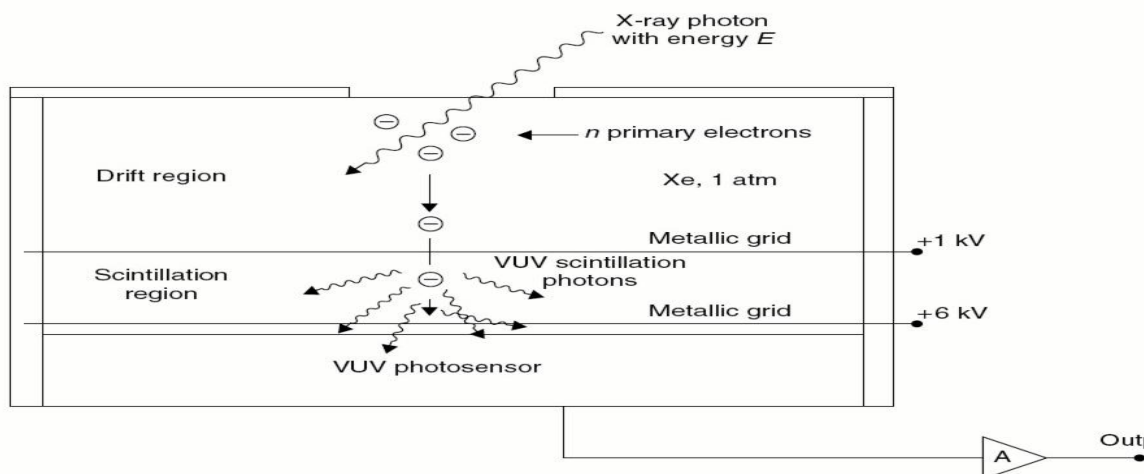
1. **T.Z. Kowalski**, *Measurements and parametrisation of the gas gain in proportional counters*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A234(1985)521-526.
2. **T.Z. Kowalski**, *The influence of the concentration of the quench gas on the count rate effect in proportional counters*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A239(1985)551-555.
3. **T.Z. Kowalski**, *Generalized parametrisation of the gas gain in proportional counters*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A243(1986)501-504.
4. **T.Z. Kowalski**, *On the generalized gas gain formula for proportional counters*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A244(1986)533-536.
5. **T.Z. Kowalski**, J. Zając, *Concentration dependence of effective ionization potential in Penning mixtures*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A249(1986)426-428.
6. **T.Z. Kowalski**, K.W. Ostrowski, J. Zając, *Concentration dependence of elektron avalanche growth in krypton + cyclohexane mixtures*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A250(1986)550-556.
7. K.W. Ostrowski, **T.Z. Kowalski**, J. Zając, *Influence of a cathode on neutralization of complex ions in a proportional counter and MWPC*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A252(1986)545-546.
8. B. Bednarek, K. Jeleń, **T.Z. Kowalski**, K.W. Ostrowski, E. Rulikowska-Zarębska, J. Zając, *Proportional counters for Mössbauer spectroscopy*, Hyperfine Interactions 29(1986)1579-1582.
9. **T.Z. Kowalski**, K.W. Ostrowski, J. Zając, *Concentration dependence of elektron avalanche growth in Kr + cyclohexane mixtures*, XVII Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Budapest 8-12 July, 1985, Contr. Papers vol 1 p. 607-608.
10. **T.Z. Kowalski**, J. Zając, *Noble gases ionization formula*, XVII Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Budapest 8-12 July, 1985, Contr. Papers vol 1 p. 400-401.
11. **T.Z. Kowalski**, J. Zając, *Krypton-cyclohexane total ionization formula*, XVII Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Budapest 8-12 July, 1985, Contr. Papers vol 1 p. 402-403.
12. **T.Z. Kowalski**, J. Zając, *Temperature effect of proportional counters filled with Ne-based mixtures*, ISRP-3, Ferrara, Sept. 30, Oct. 4, 1985, Abstract Book, p. 115.
13. **T.Z. Kowalski**, *Performance of Kr-isopentane proportional counter under extreme operating conditions*, ISRP-3, Ferrara, Sept. 30, Oct. 4, 1985, Abstract Book, p. 114.
14. **T.Z. Kowalski**, K.W. Ostrowski, J. Zając, *Proportional needles counter*, The Third Int. Conf. on Low-Level Counting Low Radioactivities'85, 21-25 October 1985, Bratislava, AbstractVI/21.

15. **T.Z. Kowalski**, K.W. Ostrowski, J. Zając, *Parametrization of gas gain in proportional counter for low radioactivities measurements*, The Third Int. Conf. on Low-Level Counting Low Radioactivities'85, 21-25 October 1985, Bratislava, Abstract VI/24.
16. B. Bednarek, K. Jeleń, **T.Z. Kowalski**, K.W. Ostrowski, E. Rulikowska-Zarebska, J. Zając, *Proportional counters for Mössbauer spectroscopy*, Abstracts of invited and contributed papers of the Int. Conf. on the Appl. of the Mössbauer effect, September 16-20, 1985, Leuven, p. 12.34.
17. **Urząd Patentowy** Polskiej Rzeczpospolitej Ludowej, **Świadectwo Autorskie** o dokonaniu wynalazku, **Tadeusz Kowalski** i K. Ostrowski dokonali wynalazku pt. *Licznik zamknięty promieniowania jonizującego X i β* , opatentowanego przez Urząd patentowy Polskiej Rzeczpospolitej Ludowej Nr 147541, 1989 rok.

3.3 Pobyty w Europejskim Ośrodku Badań Kosmicznych, ESTEC (1986 rok).

Od stycznia 1986 do stycznia 1987 przebywałem na stypendium Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej w Europejskim Ośrodku Badań Kosmicznych, ESTEC w Nordwijk aan Zee w Holandii (ESTEC – European Space Research and Technology Center). ESTEC jest głównym centrum technologicznym Europejskiej Agencji Przestrzeni Kosmicznej, ESA (ESA – European Space Agency). W tym okresie w Holandii na różnego rodzaju stypendiach były trzy osoby.

Podczas pobytu w ESTEC-u zajmowałem się badaniem i rozwojem gazowych scyntylacyjnych liczników proporcjonalnych, GSPC (GSPC Gas Scintillation Proportional Counter) dla zastosowań w astrofizyce. Schemat detektora GSPC pokazano na rys. 21.



Rys. 21 Schemat detektora typu GSPC.

W detektorze tym w strefie dryfu mierzone promieniowanie X o energii E wytwarza $n = E/W$ elektronów pierwotnych (W- energia potrzebna na wytworzenie jednej pary jon-elektron w gazie wypełniającym licznik). Powstałe elektrony całkowitej jonizacji pierwotnej dryfują w kierunku obszaru scyntylacji (natężenie pola w obszarze dryfu jest $\sim 0,5 - 1$ kV/cm). W obszarze scyntylacji natężenie pola elektrycznego jest ~ 5 kV/cm. W polu tym elektrony uzyskują wystarczającą energię aby

wzbudzać gaz,

$e^- + Xe \rightarrow e^- + Xe^*$, co daje początek kolejnym reakcjom

$Xe^* + Xe + Xe \rightarrow Xe_2^* + Xe$,

$Xe_2^* \rightarrow Xe_2 + \text{foton VUV}$.

Mierzmy fotony VUV z rozpadu Xe_2^* . Detektor GSPC jest detektorem wolnym, czas trwania impulsu wynosi $\sim \mu s$, kształt impulsu jest bardzo regularny, krótki czas narastania (czas narastania impulsu jest równy czasowi przejścia przez siatkę oddzielającą obszar dryfu od strefy scyntylacji chmury elektronów jonizacji pierwotnej) i opadania oraz długi czas trwania. Pozwala to na bardzo dokładną analizę jego kształtu. Na podstawie analizy kształtu impulsów można odrzucić przypadki tła. Stosunek ilości kwantów X, które chcemy zmierzyć do całkowitej ilości cząstek wpadających do detektora w pomiarach astrofizycznych wynosi $\sim 1:200$. Możliwość analizy kształtu impulsów bardzo podnosi efektywność odrzucania przypadków tła.

W ośrodku ESTEC przebywałem jeszcze dwukrotnie, jesienią 1987 przez sześć tygodni i jesienią 1988 roku cztery tygodnie jako ekspert programu SAX (Satellite for Astronomy in X-rays). Satelita SAX to była włoska misja kosmiczna, której celem był pomiar miękkiego galaktycznego promieniowania X o energii od 0,1 keV do 200 keV. Satelita wyposażony był w trzy spektrometry na bazie GSPC z okienkiem berylowym do pomiaru promieniowania X w zakresie energii od 1 keV do 10 keV i jeden spektrometr też na bazie GSPC z okienkiem z polipropylenu do pomiaru promieniowania X w zakresie energii od 0,1 keV do 10 keV. Brałem udział w testowaniu tego spektrometru. Jako pierwszy w ESTEC-u zmierzyłem linię CK_{α} (0,3 keV). Uważam to za mój sukces, że spektrometr w testowaniu którego brałem aktywny udział został zaakceptowany jako wyposażenie pokładowe satelity. Na podstawie pomiarów wykonanych przez satelitę SAX powstało ok. 1500 publikacji.

W ESTEC-u przebywałem pod koniec lat 80-tych, jest to okres burzliwych przemian społecznych w Polsce, mur berliński nadal stał i na zaproszenie mnie w roli eksperta misji zgodę musiało wydać dwóch dyrektorów Europejskiej Agencji Przestrzeni Kosmicznej (ESA), dyrektor do spraw naukowych i dyrektor do spraw personalnych a straż przemysłowa ESTEC-u nie ukrywała, że byłem „osobą pod specjalnym nadzorem”.

3.3.1. Spis publikacji i raportów związanych z moim pobylem w ośrodku ESTEC

- E1. A. Smith, A. Peacock, **T.Z. Kowalski**, *A gas scintillation proportional counter for the X-ray astronomy satellite SAX*, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-34(1987)57-60.
- E2. **T.Z. Kowalski**, A. Smith, A. Peacock, *Fano factor implications from gas scintillation counter measurements*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 279(1989)567-572.
- E3. A. Smith, F. Favata, **T.Z. Kowalski**, *Gas pressure and reduced electric field effects in gas scintillation proportional counters*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 284(1989)375-380.
- E4. F. Favata, A. Smith, M. Bavdaz, **T.Z. Kowalski**, *Light field as a function of gas pressure and electric field In gas scintillation proportional counters*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 294(1990)595-601.
- E5. **T.Z. Kowalski**, A. Peacock, B.G. Taylor, J.J. Valero, A. Smith, *Energy dependence of the F*W product*, XVIII Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, 13-17 July 1987, Swansea, Contributed Papers, p. 74-75.
- E6. **T.Z. Kowalski**, *Mechanism of proportional scintillation in Xenon*, Booklet of Abstracts, VIIIth Int. Conf. on Hyperfine Interactions, Prague, August 14-19, 1989, C-16.
- E7. **T.Z. Kowalski**, A. Smith, A. Peacock, *Fano factor implications from gas scintillation proportional counter measurements*, ESTEC, Eslab 89/29.
- E8. **T.Z. Kowalski**, A. Smith, A. Peacock, *Some remarks on the secondary scintillation output of Xe in GSPC*, Contributed paper in Int. Conf. on Phenomena in Ionised Gases XIX, Belgrade 10-

14 July 1989.

3.4 Współpraca z eksperymentem ZEUS, 1988 - 2006

Współpracę z eksperymentem ZEUS zacząłem od udziału w testach prototypu kalorymetru uzupełniającego BAC (BACking Calorimeter) na wiązce H1 w CERNie. W ramach przygotowań do testów wykonałem pomiary parametrów mieszaniny Ar – CO₂ (wzmocnienie gazowe, efekt temperaturowy, wpływ ciśnienia). Ponadto wykonałem elementy systemu gazowego niezbędnego do testów.

3.4.1 Testy prototypu kalorymetru BAC na wiązce

W ramach testów byłem odpowiedzialny za:

- projekt, wykonanie i montaż systemu gazowego zasilającego prototyp kalorymetru BAC odpowiednią mieszaniną gazową,
- system zasilania gazem podzielony był na trzy gałęzie, na wejściu i wyjściu każdej gałęzi były mojej konstrukcji liczniki proporcjonalne monitorujące jakość podawanego gazu,
- układ gazowy był układem przepływowym, otwartym co skutkowało zmianami ciśnienia gazu roboczego, temperatura w hali pomiarowej też ulegała zmianie, na podstawie wskazań liczników kontrolnych wyznaczałem współczynniki korekcji zmian ciśnienia i temperatury gazu roboczego, niezbędne do wyznaczenia liniowości odpowiedzi kalorymetru BAC.
- uczestniczyłem też w montażu i testowaniu wielosekcyjnych komór proporcjonalnych kalorymetru BAC, używanych w testach.

3.4.2 System gazowy kalorymetru BAC, informacje ogólne.

Grupa roboczo nazywana „BAC gas system” działała w ramach Zakładu Fizyki Cząstek Elementarnych i Detektorów Wydziału Fizyki i Techniki Jądrowej. Do zadań tej grupy należało zaprojektowanie, wykonanie i obsługa systemu w trakcie jego eksploatacji. Układ zrealizowano w oparciu o pewne założenia. System miał być układem otwartym, umożliwiającym regulację koncentracji czynnika gaszącego w zakresie od 10 do 15%. Komory kalorymetru miały pracować przy niewielkim nadciśnieniu względem ciśnienia atmosferycznego. System gazowy miał odtwarzać strukturę zasilania komór wysokim napięciem. Wszystkie komory miały być podłączone równolegle tak aby w przypadku stwierdzenia nieszczelności była możliwość odłączenia pojedynczej komory od układu zasilania gazem. Układ gazowy składał się z części naziemnej i części znajdującej się w hali eksperymentu ZEUS. Część naziemna to zbiorniki z ciekłym argonem i ciekłym dwutlenkiem węgla oraz maszyna mieszająca te dwa gazy. Najważniejszymi elementami mieszalnika były sterowane elektronicznie zawory i przepływomierze, miernik koncentracji CO₂ oraz proporcjonalne liczniki kontroli jakości gazu. Mieszalnik miał wydajność wytwarzania mieszaniny Ar – CO₂ do 240 m³/doba co umożliwiło 4-ry wymiany gazu na dobę w komorach kalorymetru. W hali eksperymentu ZEUS był system dystrybucji gazu. System dystrybucji gazu był podzielony na 79 niezależnych gałęzi. W każdej gałęzi gazowej był: zawór, służący ustaleniu przepływu mieszaniny w gałęzi, dwa elektroniczne przepływomierze, mierzące ilość mieszaniny wpływającej i wypływającej (różnica dawała informację o nieszczelności gałęzi) oraz liczniki kontrolne jakości gazu na wejściu i wyjściu każdej gałęzi. Wielkość przepływu mieszaniny w gałęzi był dobierany odpowiednio do ilości komór w gałęzi i do wymaganej ilości wymian na dobę. Konstrukcja systemu pozwalała na indywidualne ustalanie przepływu gazu dla każdej gałęzi niezależnie.

3.4.3. Mój udział w budowie systemu gazowego kalorymetru BAC

1. Byłem koordynatorem prac związanych z projektowaniem, budową i eksploatacją systemu gazowego kalorymetru BAC.
2. Prowadziłem badania laboratoryjne procesu mnożenia lawinowego w docelowej mieszaninie

- robotycznej Ar – CO₂ w funkcji koncentracji domieszki w geometrii komory wielo segmentowej.
3. Prowadziłem systematyczne pomiary laboratoryjne efektów starzeniowych w komorach wielo segmentowych (multicell) kalorymetru BAC w warunkach zbliżonych do ich pracy w detektorze i detektorów zestarzonych w realnych warunkach eksperymentu.
 4. Na wejściu i wyjściu każdej gałęzi gazowej były liczniki kontrolne. Byłem konstruktorem tych liczników. Brałem udział w ich montażu, testowaniu i corocznej ich kontroli w czasie eksploatacji systemu.
 5. Na wejściu i wyjściu każdej gałęzi były przepływomierze. Opracowałem procedurę ich kalibracji i brałem udział w corocznej ich re-kalibracji.
 6. Brałem udział w projekcie, wyborze elementów, budowie i testowaniu maszyny mieszającej gaz.
 7. Brałem udział w pomiarach i analizie jednorodności rozplywu gazu na poszczególne komory w gałęzi gazowej.
 8. Ze wszystkich 158 liczników kontrolnych były zbierane widma Fe-55. Widma były archiwizowane, dla każdego z nich wyznaczano położenie pików i energetyczną zdolność rozdzielczą. Brałem udział w analizie otrzymanych rezultatów, ze szczególnym uwzględnieniem efektów starzeniowych.
 9. System gazowy był systemem otwartym i gęstość gazu w komorach zmieniała się wraz ze zmianą temperatury i ciśnienia atmosferycznego. Odpowiedni układ czujników pozwalał na pomiar rozkładu temperatur w jarzmie żelaznym kalorymetru i zmiany ciśnienia gazu roboczego. Współuczestniczyłem w wyznaczaniu współczynników korekcji zmian temperatury i ciśnienia.
 10. Przed zamontowaniem w kalorymetrze każda komora była testowana. Wyznaczana była charakterystyka częstościowa, mierzona była jednorodność odpowiedzi komory wzdłuż drutu anodowego oraz mierzony był prąd upływu na izolatorach. Osoba testująca podejmowała decyzję o zamontowaniu komory w kalorymetrze, jej naprawie lub odrzuceniu. Brałem bardzo aktywny udział w testowaniu komór, nawet 16godz./doba.
 11. Jako członek kolaboracji ZEUS oprócz bieżącej obsługi systemu gazowego kalorymetru BAC brałem udział w zbieraniu danych przez eksperyment ZEUS, w tzw. szychtach, jako osoba odpowiedzialna za bezpieczeństwo detektora (szychty safety) i jako zastępca kierownika szycht (Deputy to Shift leader). Szacuję, że uczestniczyłem w ok. (60-70) blokach szycht, jeden blok to 4-ry szychty 8-mio godzinne.
 12. Przez krótki czas (ok. 1 rok) współpracowałem z detektorem śladowym STT eksperymentu ZEUS (STT straw tube tracker). Moim zadaniem był dobór mieszaniny gazowej dla tego detektora i dobór napięcia pracy detektorów słomkowych.

3.4.4. Spis publikacji i raportów związanych z moją współpracą z eksperymentem ZEUS

- Z1. H. Abramowicz et al. (**T.Z. Kowalski**), *Intercalibration of the ZEUS high resolution and backing calorimeters*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 313(1992)126-134.
- Z2. **T.Z. Kowalski**, A.R. Stopczyński, *The gas gain process in Ar-CO₂ filled proportional tubes*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 323(1992)289-293.
- Z3. M. Bobrowski, K. Jeleń, S. Koperny, **T.Z. Kowalski**, W. Machowski, E. Rulikowska-Zarębska, J. Zając, *Proportional counters as monitoring detectors of BAC Chambers at the ZEUS experiment*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 313(1992)309-313.
- Z4. B. Bednarek, K. Jeleń, S. Koperny, **T.Z. Kowalski**, J. Zając, *A study of aging effects in gas proportional detectors at the BAC calorimeter of the ZEUS experiment*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 348(1994)228-231.
- Z5. B. Bednarek, K. Jeleń, S. Koperny, **T.Z. Kowalski**, E. Rulikowska-Zarębska, J. Zając, *Anode*

- wire ageing in proportional detectors at the BAC calorimeter of the ZEUS experiment, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 392(1997)51-54.
- Z6. **T.Z. Kowalski**, B. Mindur, *Manifestation of aging effects in gas proportional counters*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 515(2003)180-184.
- Z7. **T.Z. Kowalski**, B. Mindur, *A study of aging effects in gas monitoring proportional counters of BAC calorimeter in the ZEUS experiment*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 515(2003)60-64.
- Z8. ZEUS Collaboration, *The ZEUS Detector Technical Proposal*, DESY, 1986.
- Z9. ZEUS Collaboration, *The ZEUS Detector Status Report 1993*, DESY, 1993.
- Z10. H. Czyrkowski, et al. (**T. Kowalski**), *Tests of the BAC prototype*, ZEUS Note 90-099, 1990.
- Z11. M. Deptuch, S. Koperny, **T.Z. Kowalski**, B. Mindur, *The temperature coefficient of the gas gain in the chamber of BAC Calorimeter*, Internal Report, DESY, ZEUS Note 03-025, 2003.
- Z12. B. Bednarek, K. Jeleń, S. Koperny, **T.Z. Kowalski**, J. Zając, *Control of Gas Flow in BAC Calorimeter at the ZEUS Experiment*, Internal Report, DESY, ZEUS Note 93-093, 1993.
- Z13. B. Bednarek, K. Jeleń, S. Koperny, **T.Z. Kowalski**, E. Rulikowska-Zarebska, J. Zając, *The Temperature Distribution in the Iron Yoke at the ZEUS Experiment*, Internal Report, DESY, ZEUS Note 95-033, 1995.
- Z14. M. Deptuch, K. Jeleń, S. Koperny, **T.Z. Kowalski**, B. Mindur, *Some remarks on Ageing Effects in ZEUS – BAC Multicell Chambers*, ZEUS Note 02-003, 2002.
- Z15. B. Bednarek, K. Jeleń, S. Koperny, **T.Z. Kowalski**, J. Zając, *A study of Aging Effect in Gas Proportional Detectors at BAC calorimeter of the ZEUS Experiment*, ZEUS Note 93-100, 1993.
- Z16. B. Bednarek, K. Jeleń, S. Koperny, **T.Z. Kowalski**, J. Zając, *Monitoring Proportional Counters in BAC Gas System at the ZEUS Experiment*, ZEUS Note 93-095, 1993.
- Z17. H. Abramowicz, et al., (**T.Z. Kowalski**), *Intercalibration of the ZEUS High Resolution and Backing Calorimeters*, DESY 91-081, 1991.
- Z18. H. Abramowicz et al. (**T.Z. Kowalski**), *Tests of the BAC prototype*, ZEUS Note 90-099, 1990.
- Z19. H. Abramowicz et al. (**T.Z. Kowalski**), *New method of pulse height and time reconstruction for BAC*, ZEUS Note 90-91, 1990.
- Z20. H. Abramowicz et al. (**T. Kowalski**), *Intercalibration of the ZEUS Backing Calorimeter with the Uranium Calorimeter*, ZEUS Note 90-88, 1990.
- Z21. B. Bednarek, M. Deptuch, S. Koperny, **T.Z. Kowalski**, B. Mindur, *BAC gas system-general information and instruction for safety officer*, ZEUS Note 01-052, 2001.
- Z22. B. Bednarek, K. Jeleń, S. Koperny, **T.Z. Kowalski**, E. Rulikowska-Zarebska, J. Zając, *The Temperature Distribution in the Iron Yoke at the ZEUS Experiment*, ZEUS Note 95-033, 1995.

3.5. Współpraca z eksperymentem ATLAS

Pierwotnie współpracowałem z eksperymentem EAGLE. Eksperyment EAGLE połączył się z eksperymentem ASCOT i powstał eksperyment ATLAS. Gazowe detektory mikro paskowe były jedną z propozycji detektora wewnętrznego. W tej kolaboracji koordynowałem prace związane z budową systemu gazowego zasilającego te detektory. Detektory mikro paskowe przez kolaborację ATLAS nie zostały przyjęte do realizacji. Wtedy przewędrowałem do detektora promieniowania przejścia (TRT). Spis literatury z tego okresu zawiera zarówno prace dotyczące detektorów mikro paskowych jak i detektora promieniowania przejścia TRT.

3.5.1 Uwagi ogólne o eksperymencie ATLAS i detektorze promieniowania przejścia TRT

Przed detektorem TRT (Transition Radiation Tracker) stawiane są dwa podstawowe zadania. Pierwszym z nich jest rejestracja śladów cząstek jonizujących przelatujących przez detektor. Szacuje się, że w trakcie pracy detektora rekonstrukcja toru będzie możliwa dzięki rejestracji około 35 punktów przypadających na jeden ślad. Drugim, bardzo ważnym zadaniem jest identyfikacja elektronów o pędach poprzecznych rzędu ok. 40 GeV, poprzez rejestrację generowanego przez nie promieniowania przejścia, które emitowane jest podczas przejścia cząstki naładowanej przez granicę ośrodków o różnych stałych elektrycznych. Śladowy detektor promieniowania przejścia jest układem bardzo złożonym. W jego skład wchodzi ok. 300000 proporcjonalnych liczników słomkowych. Detektor promieniowania przejścia jest jednym z podzespołów detektora wewnętrznego znajdującego się w samym centrum eksperymentu ATLAS. Zaprojektowany został w ten sposób, aby działał w polu magnetycznym o indukcji 2T wytwarzanym przez solenoidalną cewkę otaczającą cały detektor wewnętrzny. Detektor promieniowania przejścia ma budowę modułową. Centralna część detektora promieniowania przejścia składa się z trzech współśrodkowych, cylindrycznych pierścieni. Każdy z pierścieni zawiera z kolei po 32 w pełni niezależne moduły, w których jeden obok drugiego umieszczone są detektory słomkowe o długości 144 cm ułożone równoległe do osi wiązki. End-capy to boczne moduły detektora promieniowania przejścia. W tej części słomkowe detektory proporcjonalne są umieszczone radialnie do osi wiązki. Każdy end – cap składa się z zestawu identycznych i niezależnych kół. W kołach długości słomek wynoszą 39 cm. Detektory słomkowe zastosowane w eksperymencie posiadają geometrie cylindryczną. Zbudowane są z przewodzącej katody o średnicy 4 mm (stąd nazwa słomkowe) oraz z umieszczonej centralnie anody o średnicy 30 μm . Jednym z zadań detektora TRT jest identyfikacja elektronów poprzez rejestrację generowanego przez nie promieniowania przejścia. Aby jak najlepiej zrealizować to zadanie potrzebny jest układ stabilizacji wzmocnienia gazowego w słomkach TRT. Założono, że do poprawnej pracy całego układu wahania wartości wzmocnienia gazowego nie mogą być większe niż 5%. Ustalono, że maksymalny, dopuszczalny gradient temperatury w TRT nie może przekraczać 10°C. Z przeprowadzonych symulacji wynikało, że większy gradient temperatur mógłby spowodować mechaniczne uszkodzenia detektora. Trzeba podkreślić, że temperatura ma duży wpływ na wartość wzmocnienia gazowego. Jest to związane ze zmianą gęstości gazu przepływającego przez słomki przy wahaniami temperatury. W czasie działania akceleratora wszystkie części TRT znajdują się w silnym polu promieniowania jonizującego. Gaz wypełniający liczniki będzie więc podlegał nieustającemu napromienianiu, w wyniku czego może zachodzić dysocjacja składników mieszaniny prowadząca do zmiany jej składu chemicznego, w efekcie również powodującej wahania wartości wzmocnienia gazowego. Wszelkie zmiany w koncentracji składników roboczej mieszaniny gazowej, wartości ciśnienia atmosferycznego i temperatury wpływają znacznie na wartość wzmocnienia gazowego w detektorach, a szczególnie w quasi-przepływowych

detektorach gazowych, jakimi są detektory słomkowe. Ażeby uzyskać odpowiednio wysoką stabilność pracy całego detektora TRT oraz funkcjonalność w identyfikacji elektronów konieczne jest utrzymanie wzmocnienia gazowego na stałym poziomie. W tym celu został zaprojektowany i zbudowany system stabilizacji wzmocnienia gazowego (GGSS – Gas Gain Stabilisation System).

3.5.2 Mój udział w budowie detektora promieniowania przejścia TRT eksperymentu ATLAS.

1. Projekt, budowa, testy i koordynacja prac związanych z budową systemu stabilizacji wzmocnienia gazowego (GGSS).
2. Badanie mieszanin gazowych dla słomek detektora TRT, Ar-CO₂-CF₄, Xe-CO₂-CF₄, Xe-CO₂-O₂.
3. Badanie jednorodności odpowiedzi detektorów wzdłuż anody (bardzo ważne dla detektorów słomkowych części centralnej detektora, w której długość słomek wynosi ~ 140 cm).
4. Pomiar charakterystyk częstotściowych detektorów słomkowych.
5. Pomiar zależności energetycznej zdolności rozdzielczej od napięcia zasilania.
6. Pomiar wpływu ciśnienia gazu roboczego na wzmocnienie gazowe, wyznaczenie współczynnika ciśnieniowego zmian wzmocnienia gazowego.
7. Pomiar wpływu temperatury na wzmocnienie gazowe, wyznaczenie współczynnika temperaturowego wzmocnienia gazowego.
8. Badanie dyfuzji gazów przez ścianki słomek, pozwala określić straty gazu na skutek dyfuzji przez ścianki i zmianę koncentracji gazu roboczego.
9. Badanie gazowania elementów z których zbudowane są słomki i całych słomek, pomiar minimalnej ilości wymian gazu roboczego.
10. Pomiar chwilowego efektu starzenia się detektorów (temporary ageing effect).

3.5.3 Publikacje i raporty związane z moją współpracą z detektorem TRT eksperymentu ATLAS

- A1. D. Gingrich et al. (**T. Kowalski**), ATLAS – *Letter of Intent for a General-Purpose pp Experimental at the large Hadron Collider at CERN*, Raport CERN/LHCC/92-4, Genewa, 1992.
- A2. W.W. Armstrong et al. (**T. Kowalski**), ATLAS – *Technical Proposal for a General-Purpose pp Experiment at the Large Hadron Collider at CERN*, Raport CERN/LHCC/94-43, LHCCIP2, 1994.
- A3. F.E. Bakker et al. (**T. Kowalski**), ATLAS-MSGC, *Support Document for the Micro Strip Gas Counter Sub-system which is part of the Inner Detector for the ATLAS experiment at CERN*, ATLAS Internal-Note, INDET-NO-076, 1994.
- A4. B. Bednarek, K. Jeleń, **T.Z. Kowalski**, E. Rulikowska-Zarębska, J. Zając, *Overview of MSGC studies at Cracow*, ATLAS MSGC Meeting at Coseners House, Anglia, January 18-19, 1994.
- A5. B. Bednarek, K. Jeleń, **T.Z. Kowalski**, E. Rulikowska-Zarębska, J. Zając, *Review of gases used in MSGC – towards baseline gas mixture*, ATLAS+MSGC Meeting, Prague, May 23-24, 1994.
- A6. R. Bouclier et al. (**T. Kowalski**), RD-28 Collaboration, *Development of micro-strip gas chambers for radiation detection and tracking at high rates*, RD-28 Status Report,

CERN/DRDC/93-94, Geneva, 1993.

- A7. A. Airapetian et al. (**T. Kowalski**), *ATLAS calorimeter performance, Technical Design Report*, CERN-LHCC-96-40 (Dec 1996)189p.
- A8. A. Airapetian et al. (**T. Kowalski**), *ATLAS computing technical proposal*, CERN-LHCC-96-43 (Dec 1996) 100p.
- A9. F. Sauli et al. (**T. Kowalski**), *Development of microstrip gas chambers for radiation detection and cracking at high rates*, RD-28 Collaboration, CERN-DRDC-94-45 (Jan 1995) 54p.
- A10. T. Akesson et al. (**T. Kowalski**), *Particle identification using the time-over-threshold method in the ATLAS Transition Radiation Tracker*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 474(2001)172-187.
- A11. E. Abat, et al. (**T.Z. Kowalski**), *The ATLAS TRT barrel detector*, Journal of Instrumentation, 2008 JINST 3 P02014.
- A12. E. Abat, et al. (**T.Z. Kowalski**), *The ATLAS Transition Tracker (TRT) proportional drift tube: design and performance*, Journal of Instrumentation, 2008 JINST 3 P02013.
- A13. T. Akesson, et al. (**T.Z. Kowalski**), *Aging studies for the ATLAS Transition Radiation Tracker (TRT)*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 515(2003)166-179.
- A14. T. Akesson, et al. (**T.Z. Kowalski**), *Status of design and construction of the Transition Radiation Tracker (TRT) for the ATLAS experiment at the LHC*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 522(2004)131-145.
- A15. M. Capeans, et al. (**T.Z. Kowalski**), *Recent aging studies for the ATLAS transition radiation tracker*, IEEE Trans. On Nucl. Science 51,3(2004)960-967.
- A16. T. Akesson, et al. (**T.Z. Kowalski**), *ATLAS Transition Radiation Tracker test-beam results*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 522(2004)50-55.
- A17. M. Deptuch, **T.Z. Kowalski**, *Gas multiplication process in mixtures based on Ar,CO₂,CF₄*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 572(2007)184-186.
- A18. T. Akesson, et al. (**T.Z. Kowalski**), *An X-ray scanner for wire Chambers*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 507(2003)622-635.
- A19. K. Jeleń, S. Koperny, **T.Z. Kowalski**, et al. *Gas gain in MSGCs with Ar/CO₂/CF₄ mixtures*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 392(1997)80-82.
- A20. St. Koperny, **T.Z. Kowalski**, *Operation of proportional counters under high gas gain, high working gas pressure in mixed field of radiation*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 718(2013)575-576.
- A21. M. Deptuch, **T.Z. Kowalski**, *Performance of Ar/CO₂ filled proportional counters under high gas gain at high working gas pressure*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 572(2007)181-183.
- A22. M. Deptuch, **T.Z. Kowalski**, B. Mindur, *Change in detector properties caused by electronegative impurities*, Nuclear Physics B-Proceedings Suppl. 150(2006)398-401.

- A23. M. Deptuch, **T.Z. Kowalski**, B. Mindur, *Performance of Xe-filled counters under high gas gain*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 518(2004)579-581.
- A24. M. Deptuch, **T.Z. Kowalski**, B. Mindur, *Performance of straw proportional tubes under high gas gain, transition to self-quenching streamer mode and corona dis charge*, Nuclear Physics B-Proceedings Suppl. 125(2003)390-393.

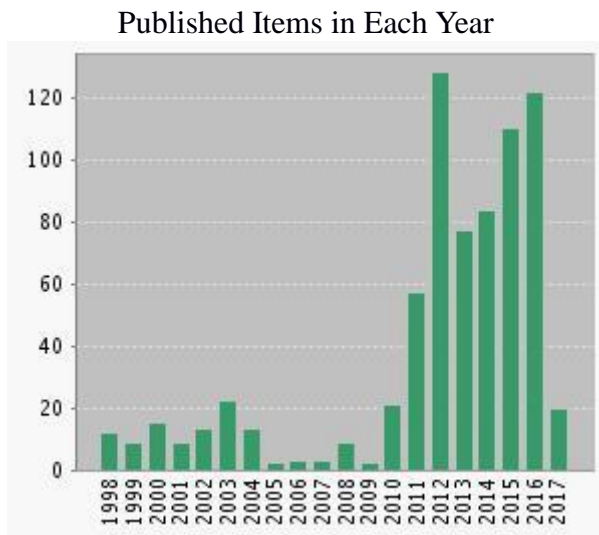
4. Sumaryczny Impact Factor publikacji naukowych zgodnie z rokiem opublikowania.

Citation Report: **808**

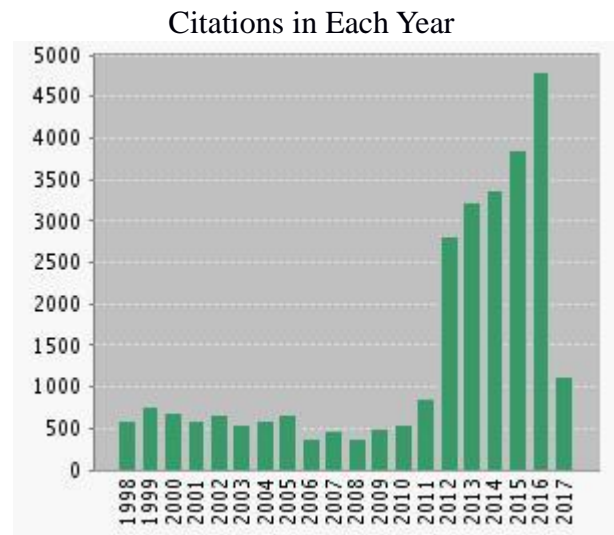
(from Web of Science Core Collection)

You searched for: **AUTHOR:** (Kowalski T*)

This report reflects citations to source items indexed within Web of Science Core Collection. Perform a Cited Reference Search to include citations to items not indexed within Web of Science Core Collection.



The latest 20 years are displayed.



The latest 20 years are displayed.

Results found:	808
Sum of the Times Cited :	28834
Sum of Times Cited without self-citations	26047
Citing Articles :	14230
Citing Articles without self-citations	13483
Average Citations per Item :	35.69
h-index :	74

Lista wszystkich moich publikacji wraz z informacjami o moim udziale merytorycznym i procentowym stanowi oddzielny załącznik.

4.1 Sumaryczny Impact Factor (publikacje w cyklu habilitacyjnym):

11,65 (dla publikacji które ukazały się w 2016 roku i 2017 roku przyjąłem IF z roku 2015)

4.2 Całkowita liczba publikacji: (baza danych Web of Science, 15.06.2017)

808

Liczba cytowań wszystkich publikacji:

28834

Liczba cytowań wszystkich publikacji z pominięciem auto-cytowań:

26047

Indeks Hirsha wszystkich publikacji:

74

Większość moich publikacji jest sygnowana przez Kolaborację ZEUS i Kolaborację ATLAS. Nie brałem bezpośredniego udziału w opracowywaniu danych z tych eksperymentów, niemniej uważam, że mój udział w powstaniu tych publikacji jest znaczący. Brałem udział w budowie komponent obu eksperymentów, w ich bieżącej konserwacji, naprawie i kontroli jakości działania. Ostatecznie o jakości danych zebranych z eksperymentów decyduje poprawna praca również detektorów w budowaniu i testowaniu których uczestniczyłem. System GGSS, w eksperymencie ATLAS, budowę którego koordynowałem, jest niewielkim układem, ale jego niepoprawne działanie sprawia, że wszystkie dane z komponenty TRT są bezużyteczne dla dalszej analizy. To samo dotyczy poprawności działania systemu gazowego kalorymetru uzupełniającego BAC eksperymentu ZEUS. Uczestniczyłem w bieżącej obsłudze eksperymentów jako ACRDQ (ATLAS Control Room Data Quality Shifter), którego głównym zadaniem była bieżąca kontrola jakości zbieranych danych. Podobną rolę pełniłem w eksperymencie ZEUS jako Deputy Shifter. Aby być współautorem prac sygnowanych przez kolaboracje należało spełnić szereg warunków, odpowiednie procedury weryfikacyjne zapobiegają nieuzasadnionemu wystąpieniu na liście współautorów.

Prace cyklu habilitacyjnego [H1] do [H9] dotyczą detektorów gazowych i zjawisk fizycznych w nich zachodzących, dlatego z wszystkich moich publikacji wyłączyłem te dotyczące bezpośrednio detektorów gazowych i procesów w nich zachodzących.

Liczba publikacji bez publikacji afiliowanych przez eksperyment ZEUS i ATLAS:

55

Liczba cytowań publikacji bez afiliowanych przez eksperyment ZEUS i ATLAS

284

Liczba cytowań publikacji bez afiliowanych przez eksperyment ZEUS i ATLAS z pominięciem auto-cytowań:

243

4.3 Staże naukowe odbyte za granicą

Holandia, Nordwijk aan ZEE, ESTEC, European Space Research and Technology Centre, styczeń 1986 – styczeń 1987. Staż naukowo-badawczy, stypendium Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej w Wiedniu.

Niemcy, Hamburg, DESY, 1992 – 2006.

Wielokrotne wyjazdy, w okresie budowy i zbierania danych przez eksperyment ZEUS średnio ok. 6 miesięcy w roku (do 2003 roku), później ok. 3 miesiące w roku (do 2006 roku)

Szwajcaria, Genewa, CERN, 1988 – obecnie:

Wielokrotne wyjazdy średnio ok. 4 miesiące w roku w czasie testów prototypu kalorymetru BAC (1988 – 1990), w pozostałym terminie ok. 1- 4 miesiące w roku.

Holandia, ESTEC, 1987 rok, sześć tygodni, ekspert programu SAX (Satellite for Astronomy of X-rays).

Holandia, ESTEC, 1988 rok, cztery tygodnie, ekspert programu SAX.

Niemcy, Hamburg, DESY, 1995 rok, trzy miesiące, stypendium Wspólnoty Europejskiej.

4.4 Otrzymane nagrody

1. Nagroda zespołowa III stopnia za „Rozwój bezberylowych liczników proporcjonalnych promieniowania X”, przyznana przez Państwową Agencję Atomistyki, 1985.
2. Nagroda Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego, zespołowa stopnia drugiego „Za opracowanie nowych detektorów proporcjonalnych”, 1986.
3. Nagroda Rektora AGH za działalność naukowo-badawczą, 1983.
4. Nagroda Rektora AGH za udział w pracy badawczej, 1984.
5. Nagroda Rektora zespołowa III stopnia za działalność naukową, 1990.
6. Nagroda Rektora AGH zespołowa II stopnia za osiągnięcia naukowe, 1997.
7. Nagroda Rektora AGH zespołowa II stopnia za osiągnięcia naukowe, 2002.
8. Nagroda Rektora AGH zespołowa I stopnia za osiągnięcia naukowe, 2005.
9. Nagroda Rektora AGH zespołowa I stopnia za osiągnięcia naukowe, 2012.
10. Nagroda Rektora AGH zespołowa I stopnia za osiągnięcia naukowe, 2013.
11. Nagroda Rektora AGH zespołowa I stopnia za osiągnięcia naukowe, 2014.
12. Nagroda Rektora AGH zespołowa II stopnia za osiągnięcia naukowe, 2015.
13. Nagroda Rektora AGH zespołowa II stopnia za osiągnięcia dydaktyczne, 2016.
14. Nagroda Rektora AGH zespołowa I stopnia za osiągnięcia naukowe, 2017.

15. Srebrny Krzyż Zasługi przyznany przez Prezydenta Rzeczypospolitej Polskiej, 2003.

4.5 Udział w konferencjach międzynarodowych

1. The International Conference on Position Sensitive Detectors, cykliczna konferencja odbywająca się co trzy lata w pierwszej połowie września w Anglii, udział wielokrotny.
2. Topical Seminar on Innovative Particle and Radiation Detectors, Siena, Italy, cykliczna konferencja odbywająca się co dwa, trzy lata, udział wielokrotny.
3. Frontier Detectors for Frontier Physics, Pisa Meeting on Advanced Detectors, Isola D'Elba (La Biodola), cykliczna konferencja odbywająca się co trzy lata, udział wielokrotny.
4. Vienna Wire Chamber Conference (aktualna nazwa konferencji Vienna Conference on Instrumentation), konferencja cykliczna co trzy lata, udział wielokrotny.
5. Wielokrotne prezentacje w ramach kolaboracji ZEUS BAC Gas System, ATLAS TRT (do sierpnia 2013 byłem koordynatorem prac grupy krakowskiej) oraz CERN RD 51.

Na każdej konferencji, w której uczestniczyłem prezentowałem wyniki moich prac.

5.0 Działalność dydaktyczna i organizacyjna

5.1 Działalność dydaktyczna

Jestem odpowiedzialny za trzy moduły kształcenia:

- Fizyka ogólna na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu,
 - Detektory promieniowania, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Fizyka Techniczna, VII semestr,
 - Detekcja promieniowania w medycynie, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Fizyka Medyczna II stopień, semestr II.

5.2 Prowadzone zajęcia dydaktyczne:

- wykłady z fizyki ogólnej,
- wykłady z detektorów promieniowania,
- wykłady z detekcji promieniowania w medycynie,
- wykłady z inżynierii jądrowej – akceleratory,
- ćwiczenia rachunkowe z fizyki ogólnej,
- ćwiczenia audytoryjne z inżynierii jądrowej – akceleratory,
- ćwiczenia laboratoryjne z fizyki ogólnej,
- ćwiczenia laboratoryjne z detektorów promieniowania,
- ćwiczenia laboratoryjne z detekcji promieniowania w medycynie.

5.3 Wykłady zewnętrzne:

- Wykłady z „Metody detekcji i dozymetrii promieniowania” na studiach podyplomowych ze specjalizacji w dziedzinie fizyki medycznej organizowanych przez Centrum Onkologii Instytut im. Marii Skłodowskiej-Curie, Oddział w Krakowie, ul. Garncarska 11, 30 godzin, 2014 rok.

- Wykłady z „Detektory promieniowania” w ramach projektu Ekofizyka z ochroną radiologiczną – specjaliści dla nowoczesnej i bezpiecznej gospodarki, Uniwersytet Pedagogiczny im. Komisji Edukacji Narodowej w Krakowie, 30 godzin, 2013 rok.

5.4 Wykaz prac magisterskich wykonanych pod moją opieką:

1. **Dominika Czudek**, *Badanie współczynnika wzmocnienia gazowego w mieszaninach gazowych wykazujących mały efekt starzenia*, 1996r.
2. **Marek Pietrzyk**, *Długoterminowa stabilność detektorów słomkowych*, 1999r.
3. **Rafał Dziekanowski**, *Wpływ związków elektronegatywnych na pracę liczników proporcjonalnych*, 1999r.
4. **Anna Pietrzyk**, *Wzmocnienie gazowe w detektorach słomkowych*, 1999r.
5. **Dorota Karsznia**, *Efekty starzeniowe w detektorach gazowych*, 2000r.
6. **Jakub Wojtaszewski**, *Mnożenie lawinowe elektronów w gazach na bazie Ar w licznikach proporcjonalnych o geometrii słomki dla projektu ATLAS i ZEUS*, 2001r.
7. **Sabina Płoskonka**, *Praca liczników proporcjonalnych przy wysokich wzmocnieniach gazowych*, 2000r.
8. **Monika Puchalska**, *Mnożenie lawinowe elektronów w licznikach proporcjonalnych wypełnionych mieszaniną $Xe + CF_4 + CO_2$* , 2001r.
9. **Damian Kabat**, *Wpływ geometrii gazowych liczników proporcjonalnych na szybkość ich starzenia się*, 2003r.
10. **Michał Miska**, *Detektory słomkowe w eksperymentach fizyki wysokich energii*, 2004r.
11. **Klaudia Hajder**, *Praca detektorów gazowych przy wysokich częstościach rejestrowanego promieniowania. Chwilowy efekt starzenia się detektorów*, 2004r.
12. **Tomasz Śpilski**, *Efekt temperaturowy w przepływowych licznikach proporcjonalnych*, 2006r.
13. **Miłosz Podlaszewski**, *Komora jonizacyjna płaska do pomiaru dawki w terapii hadronowej. Projekt i badania wstępne*, 2006 r.
14. **Michał Bochenek**, *System stabilizacji wzmocnienia gazowego w detektorze promieniowania przejścia eksperymentu ATLAS*, 2007r.
15. **Paweł Radeberg**, *Praca liczników proporcjonalnych przy wysokich wzmocnieniach gazowych i ciśnieniu gazu roboczego powyżej 0,1 MPa*, 2008.
16. **Rafał Ochman**, *Praca detektorów mikrodozymetrycznych w mieszanych polach promieniowania*, 2016 r.
17. **Paweł Haduch**, *Pomiar krzywej Bragga dla cząstek alfa*, 2016.

5.5 Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze opiekuna naukowego lub promotora pomocniczego

Nie pełniłem roli promotora pomocniczego.

5.6 Członkostwo w organizacjach międzynarodowych

1. Członek Kolaboracji ZEUS od 1988 do 2006, koordynator prac grupy Wydziału FiIS nad systemem

gazowym kalorymetru BAC.

2. Członek Kolaboracji ATLAS od 1992 do aktualnie, do sierpień 2013 koordynator prac grupy Wydz. FiIS nad systemem stabilizacji wzmocnienia gazowego w detektorze TRT.
3. Członek Kolaboracji CERN RD-28, Development of micro strip gas chambers radiation detection and cracking at high rates, 1992 – 1996.
4. Członek Kolaboracji CERN RD-51, Development of Micro-Patern Gas Detectors Technologies, od 2012 do aktualnie.

5.7 Działalność organizacyjna

1. Recenzent czasopisma, Nuclear Instrument and Method in Physics Research A.
2. Recenzent czasopisma, Applied Radiation and Isotopes.
3. Recenzent czasopisma, Nukleonika.
4. Członek Wydziałowej Komisji Rekrutacyjnej na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH, Kraków.
5. Kierownik zorganizowanych przeze mnie laboratoriów studenckich, Detektory promieniowania i Detekcja promieniowania w medycynie.

5.8 Udział w grantach jako wykonawca

1. Specjalne urządzenie badawcze (SPB) dotyczący eksperymentu ZEUS na akceleratorze HERA w DESY, Hamburg, od 1988 do 2006 (kolejne edycje grantu).
2. Specjalne urządzenie badawcze (SPB) dotyczący eksperymentu ATLAS na akceleratorze LHC w CERN, Genewa, od 1992 do 2013 (kolejne edycje grantu).
3. Harmonia, grant NCN, dotyczy współpracy RD51 w CERN.

6.0 Uwagi końcowe

Moja praca dyplomowa pt „Długożyciowe liczniki proporcjonalne promieniowania rentgenowskiego o energii do 6 keV wypełnione neonem” dotyczyła liczników proporcjonalnych. Moja rozprawa doktorska pt „Analiza współczynnika wzmocnienia gazowego w mieszaninach gazów i par w funkcji wybranych parametrów” też dotyczyła gazowych liczników proporcjonalnych i zjawisk w nich zachodzących. Całe moje życie zawodowe związane jest z detekcją promieniowania, szczególnie z gazowymi licznikami proporcjonalnymi. Moje zainteresowania zawsze szły dwutorowo, (1) zrozumieć zjawiska fizyczne zachodzące w detektorze, (2) zbudować poprawnie działający detektor spełniający kryteria użytkownika. Realizacja (2) jest niemożliwa bez (1). Aby zrozumieć zjawiska fizyczne zachodzące w detektorze wykonywałem pomiary krzywych wzmocnienia gazowego i na ich podstawie wyznaczałem stałe charakterystyczne dla danej mieszaniny. Porównanie zmierzonych krzywych wzmocnienia gazowego i policzonych z programu MAGBOLTZ pozwoliło na wyznaczenie prawdopodobieństwa zajścia efektu Penninga, procesu istotnie zmieniającego rozwój lawiny elektronowej w detektorze. Pomiary energetycznej zdolności rozdzielczej, efektu częstościowego czy pracy detektorów przy wysokich wzmocnieniach gazowych pozwoliły wyznaczyć maksymalne stabilne wzmocnienia gazowe, maksymalne mierzone natężenia rejestrowanego promieniowania i zakresy napięć pracy detektora, parametry istotne z punktu widzenia istoty zjawisk fizycznych w detektorze jak i ich aplikacji. Oddzielnym zagadnieniem z pogranicza fizyki i chemii plazmy są procesy starzenia się detektorów. Badałem procesy starzenia się detektorów w warunkach laboratoryjnych, badałem również detektory zestarzone w ich naturalnych warunkach pracy, mam tu na myśli zarówno detektory kontrolne systemu gazowego kalorymetru BAC jak i komory wielo celowe tego kalorymetru. Drugi tor moich zainteresowań to budowa detektorów na konkretne zapotrzebowanie użytkowników.

Dotyczy to budowy i badań liczników dla efektu Mossbauera, fluorescencji rentgenowskiej, badania pęków promieniowania kosmicznego, miękkiego promieniowania X w astrofizyce, liczników kontrolnych jakości gazu w systemie gazowym kalorymetru BAC, czy dedykowanych detektorów słomkowych dla systemu stabilizacji wzmocnienia gazowego w detektorze promieniowania przejścia TRT w eksperymencie ATLAS.

7. Podziękowania

Pragnę wyrazić specjalne podziękowanie dla kierownictwa Katedry Oddziaływań i Detekcji Czastek, prof. dr hab. Kazimierzowi Jeleniowi, prof. dr hab. Danucie Kisielewskiej i prof. dr hab. Władysławowi Dabrowskiemu za wszelką pomoc w mojej działalności naukowej i dydaktycznej. Specjalne podziękowanie składam prof. dr hab. Danucie Kisielewskiej za wprowadzenie mnie w świat eksperymentu fizyki wysokich energii.

Specjalne podziękowanie składam prof. dr hab. Kazimierzowi Jeleniowi za wprowadzenie mnie w świat detekcji promieniowania.

Chciałbym też wyrazić podziękowania dla Władz Dziekańskich Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej za wsparcie w działalności naukowej i dydaktycznej.

Tadeusz Kowalski