

Analiza danych zebranych przez detektor czasu przelotu w eksperymencie NA61/SHINE w CERN

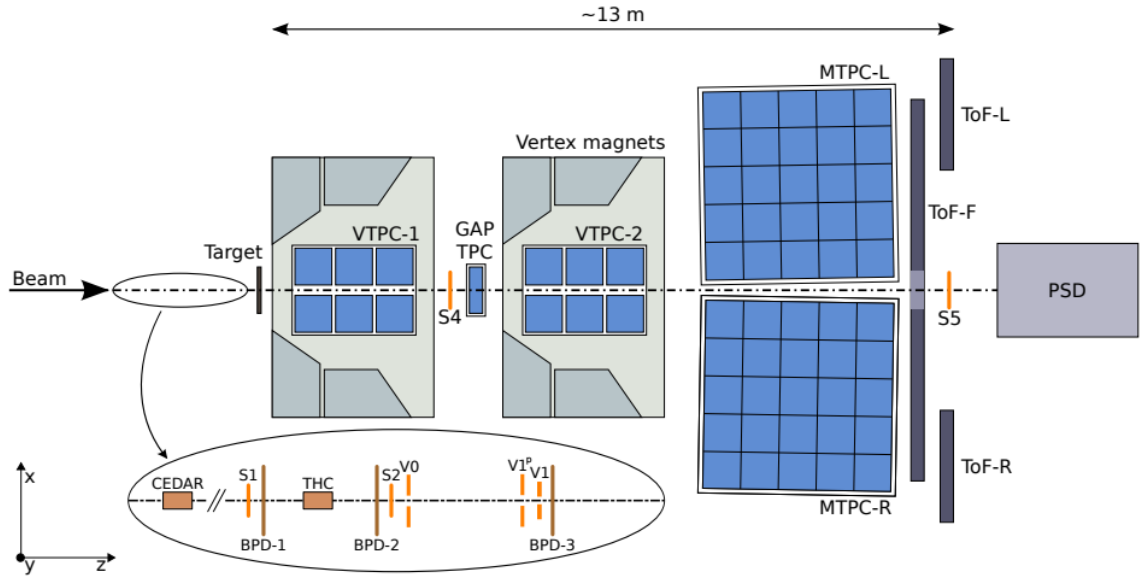
Kamil Skwarczyński

Streszczenie

Przedmiotem ćwiczenia była analiza analogowych sygnałów z modelowego detektora czasu przelotu przy użyciu dyskryminatorów sygnału LED (Leading Edge Discriminator) i CFD (Constant Fraction Discriminator). Dyskryminatory badano na przykładzie sygnałów pochodzących od przelotu protonów p i mionów μ^+ przez dwa scyntylatory. Udało się pokazać programowe metody pozwalające wyznaczyć wartości dyskryminatorów do optymalnego rozpoznawania początku sygnału.

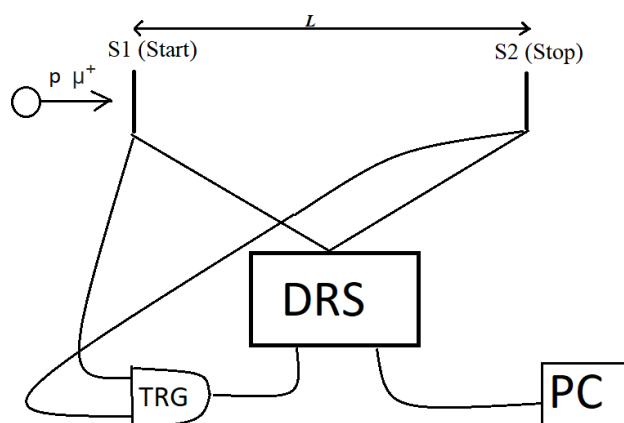
Wstęp

NA61/SHINE (*SPS Heavy Ion and Neutrino Experiment*) jest eksperymentem z dziedziny fizyki cząstek elementarnych znajdującym się w CERN-ie. Eksperyment bada hadronowe stany końcowe produkowane w wyniku zderzenia różnych wiązek (piony, protony oraz jądra berylu i ksenonu) ze stacjonarną tarczą. Poza tym NA61/SHINE wykonuje pomiary mające na celu polepszenie przewidywań początkowego strumienia neutrin w eksperymentach akceleratorowych z długą bazą. [1]. Schemat eksperymentu NA61/SHINE przedstawiono na Rysunku 1.

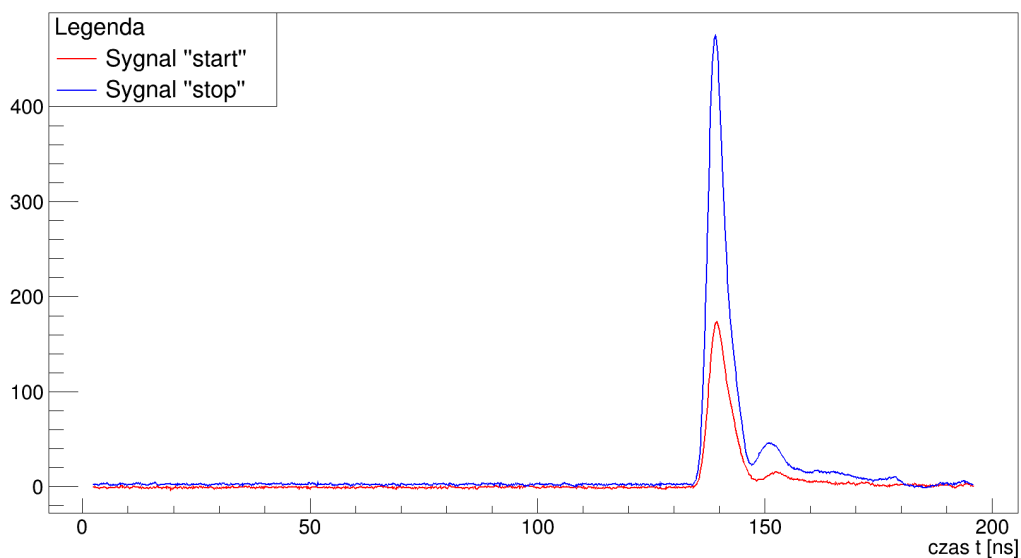


Rysunek 1: Schemat eksperymentu NA61/SHINE [1].

Układ doświadczalny mierzący czas przelotu protonów p i mionów μ^+ , z którego dane analizowano zostały przedstawione na Rysunku 2. W układzie tym znajdują się dwa scyntylatory: scyntylator S1 (start) włącza liczenie czasu, a scyntylator S2 (stop) zatrzymuje liczenie czasu. Sygnały analogowe digitalizowane są za pomocą chipów DRS (Domino Ring Sampling). Parametry DRS są następujące: częstota próbkowania 5 GHz, głębokość pamięci 1024 komórek na kanał. W skład płyty DRS wchodzi 4 chipy DRS czyli 32 kanały analogowe [4]. DRS działa podobnie do oscyloskopu co oznacza, że umożliwia zapisanie cyfrowej wersji analogowego przebiegu sygnału. Sygnałem wyzwalającym zapis przypadków na dysku jest koincydencja zdarzeń z obu scyntylatorów. Układ ten mierzy czas przelotu protonów p lub mionów μ^+ . Przykładowe sygnały przedstawiono na Rysunku 3. Aby uzyskać czas przelotu (różnica sygnału "stop" i "start") potrzebne jest przyporządkowanie określonej chwili czasu do każdego z sygnałów, dlatego korzysta się z dyskryminatorów sygnału. Dwa najbardziej powszechne typy dyskryminatorów używane na sygnałach analogowych to LED (Leading Edge Discriminator) i CFD (Constant Fraction Discriminator).



Rysunek 2: Układ doświadczalny mierzenia czasu przelotu p lub μ^+ za pomocą dwóch scyntylatorów S1 i S2.

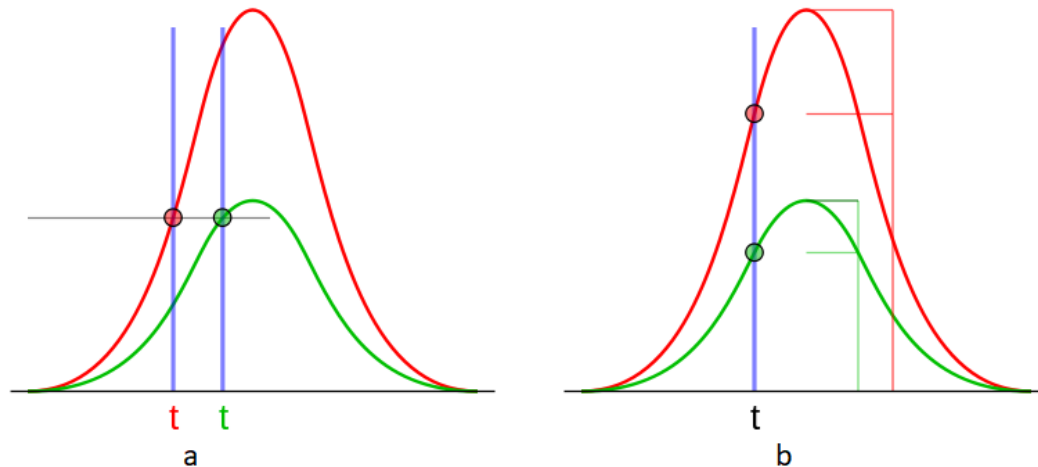


Rysunek 3: Przykładowe badane sygnały dla pędu wiązki 2 GeV/c.

Dyskryminator sygnału LED (Leading Edge Discriminator) przyporządkowuje określoną chwilę czasu do sygnału, gdy przekroczy on ustalony próg. Zasadę działania

przedstawiono na Rysunku 4a. Wynik działania LED może zależeć od amplitudy sygnału. Nie jest to dobry wybór w sytuacjach, gdzie kluczowy jest timing sygnałów.

Dyskryminator sygnału CFD (Constant Fraction Discriminator) przyporządkowuje określoną chwilę czasu do sygnału, gdy przekroczy on ustalony procent maksymalnej wartości. Zasadę działania przedstawiono na Rysunku 4b.

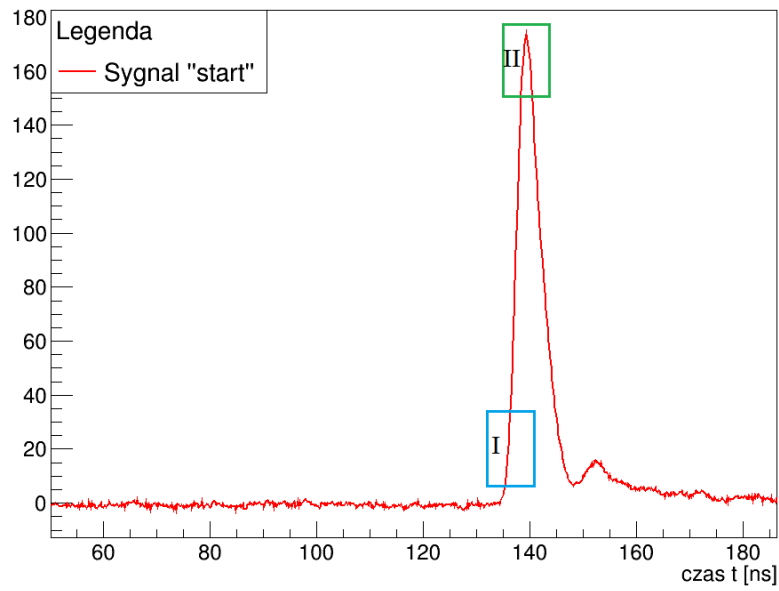


Rysunek 4: Porównanie dyskryminatora LED (a) i CFD (b) [3].

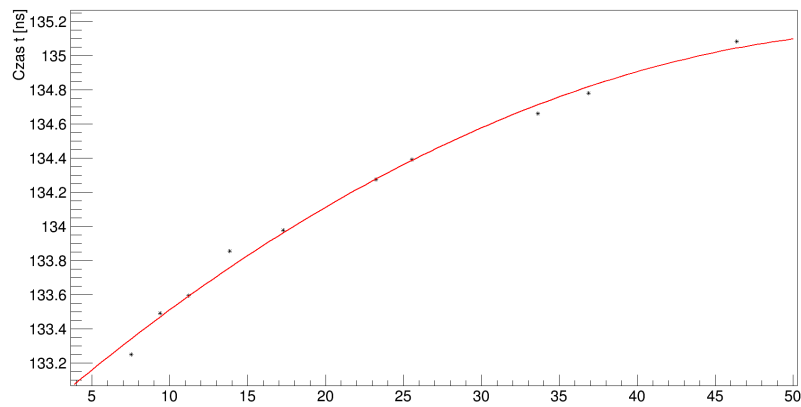
Analiza danych

Ponieważ badano sygnały czasu przelotu, w których istotne jest jak dokładnie jesteśmy w stanie mierzyć różnicę czasów, to miarą jakości dyskryminatorów będzie szerokość rozkładu czasu. W celu znalezienia wartości dyskryminatorów o najmniejszej szerokości rozkładu, sporządzono rozkład różnic czasu sygnału dla różnych wartości dyskryminatorów.

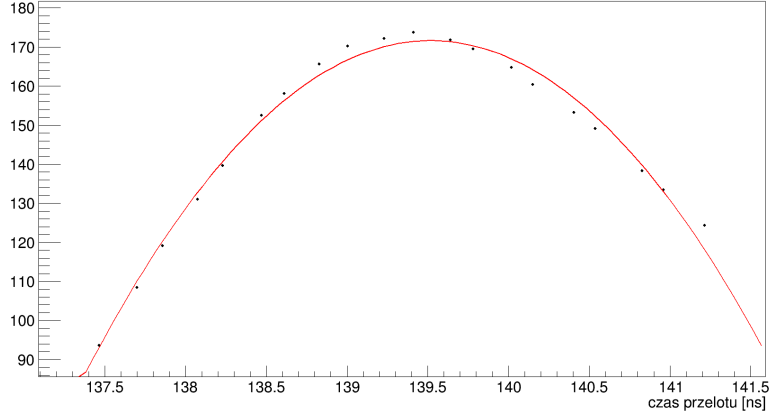
Z uwagi na to, że w następnej części będzie omawiane dopasowywanie w dwóch regionach, to dla przejrzystości sporządzono Rysunek 5 przedstawiający sygnał "start" z zaznaczonymi obszarami, w których dokonywano dopasowywania.



Rysunek 5: Przebieg sygnału "start" dla pędu wiązki 2 GeV/c, z zaznaczonymi obszarami, w których dokonywano dopasowania.

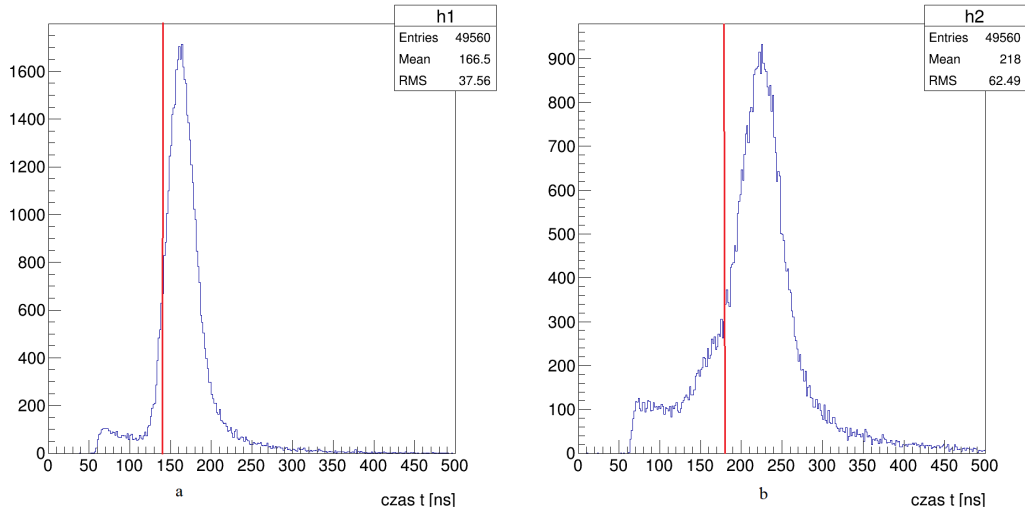


Rysunek 6: Dane dla sygnału "start", dla pędu 2 GeV/c i dopasowana funkcja kwadratowa dla 10 punktów w okolicy 20 V (obszar I na Rysunku 5).



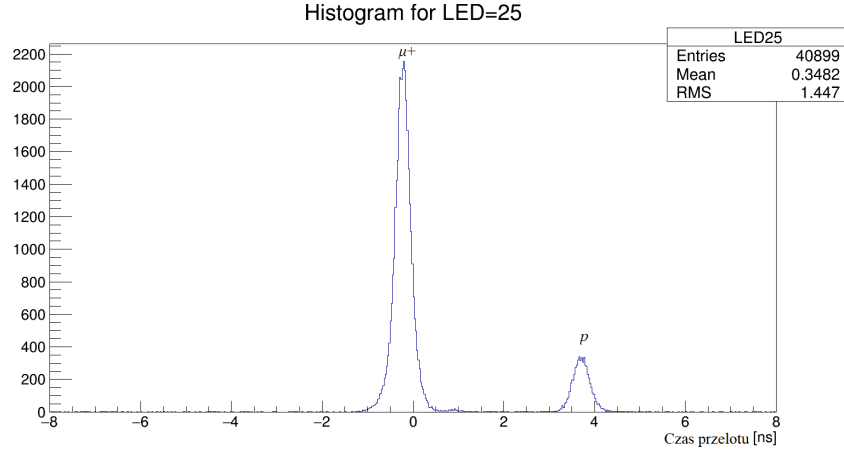
Rysunek 7: Dane dla sygnału "start", dla pędu 2 GeV/c i dopasowana funkcja kwadratowa dla 20 punktów w okolicy maksimum (obszar II na Rysunku 5).

Określoną chwilę czasu sygnału wyznaczono poprzez dopasowanie 10 punktów w okolicy szukanej wartości (obszar I na Rysunku 5) do funkcji kwadratowej, przykładowe dopasowanie przedstawiono na Rysunku 6. W przypadku dyskryminatora CFD konieczne jest znalezienie wartości maksimum sygnału. W tym celu dopasowano sygnał do funkcji kwadratowej (Rysunek 7) w okolicy maksimum (obszar II na Rysunku 5). A następnie obliczono maksimum z parametrów dopasowania za pomocą wzoru $t_{max} = -b/2a$. Ponadto, jak widać na Rysunku 3 początkowe punkty są przesunięte lekko względem zera, dlatego od maksimum sygnału odjęto średnią 100 pierwszych punktów danych. Wprowadzono cięcia jakościowe odrzucające sygnały, których amplitudy znacznie odstawały od wartości występujących najczęściej. W przypadku pierwszego sygnału były to wartości poniżej 140, a w przypadku drugiego poniżej 180. Rozkład amplitud sygnałów wraz z zaznaczoną linią pokazującą cięcie przedstawiono na Rysunku 8. Wycięcie tych danych pozwoliło zmniejszyć szerokość rozkładu różnic czasów. Przykładowy uzyskany rozkład różnicy czasów sygnałów dla wartości progu 25 (LED) przedstawiono na Rysunku 9.



Rysunek 8: Amplitudy sygnału ”start” (a) i ”stop” (b) dla pędu wiązki 2 GeV/c wraz z linią obrazującą cięcie jakościowe.

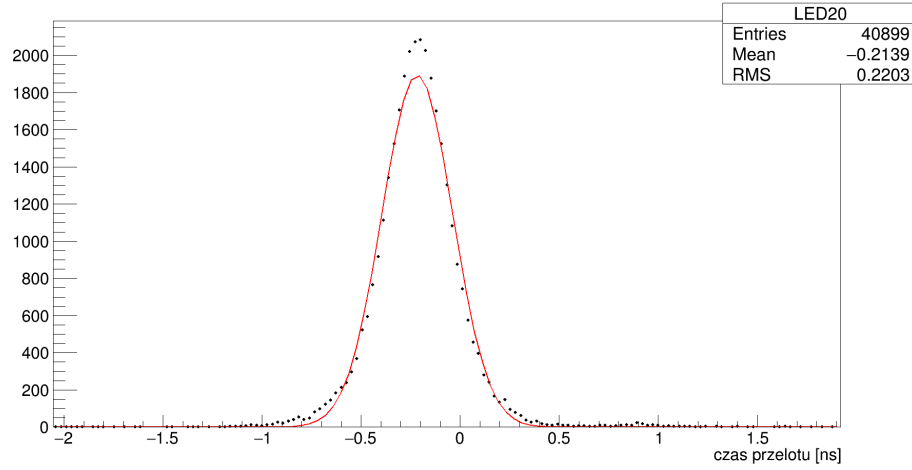
Na Rysunku 9 widać dwa piki, pierwszy w okolicy 0 ns odpowiada mionom μ^+ , a drugi w okolicy 4 ns protonom p .



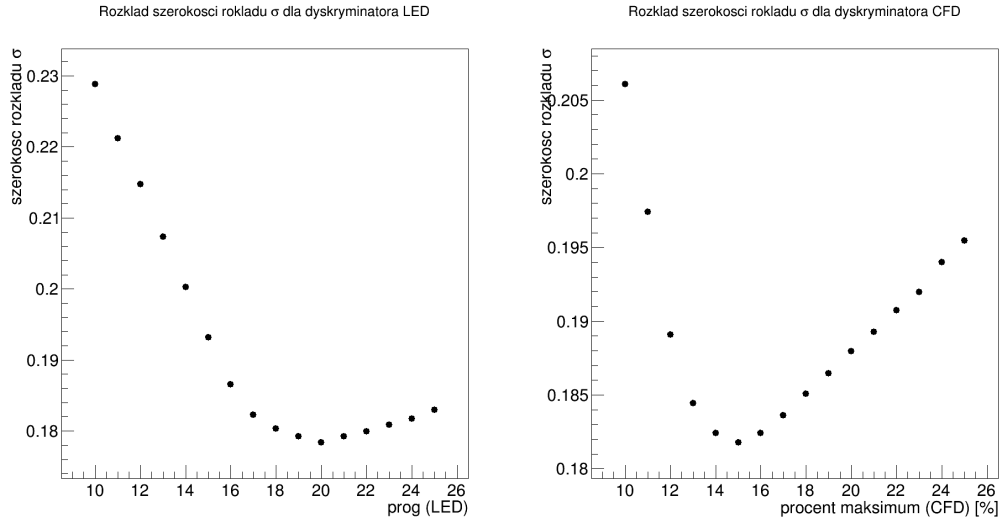
Rysunek 9: Rozkład czasu przelotu dla wartości progu 25 (LED), dla danych użytych dla pędu wiązki 2 GeV/c, z oznaczonym pikiem dla mionów i protonów.

Ponieważ rozkład czasu przelotu przypomina rozkład Gaussa, dokonano dopasowania

w okolicy maksimum i wyznaczono szerokość rozkładu σ (Rysunek 10). Szerokość rozkładu znaleziono dla różnych wartości progu (LED) i procenta maksimum (CFD), co zostało przedstawione na Rysunku 11.



Rysunek 10: Rozkład różnicy czasów sygnałów dla wartości progu 20 (LED), dla danych uzyskanych dla pędu wiązki 2 GeV/c wraz z dopasowaną krzywą Gaussowską.

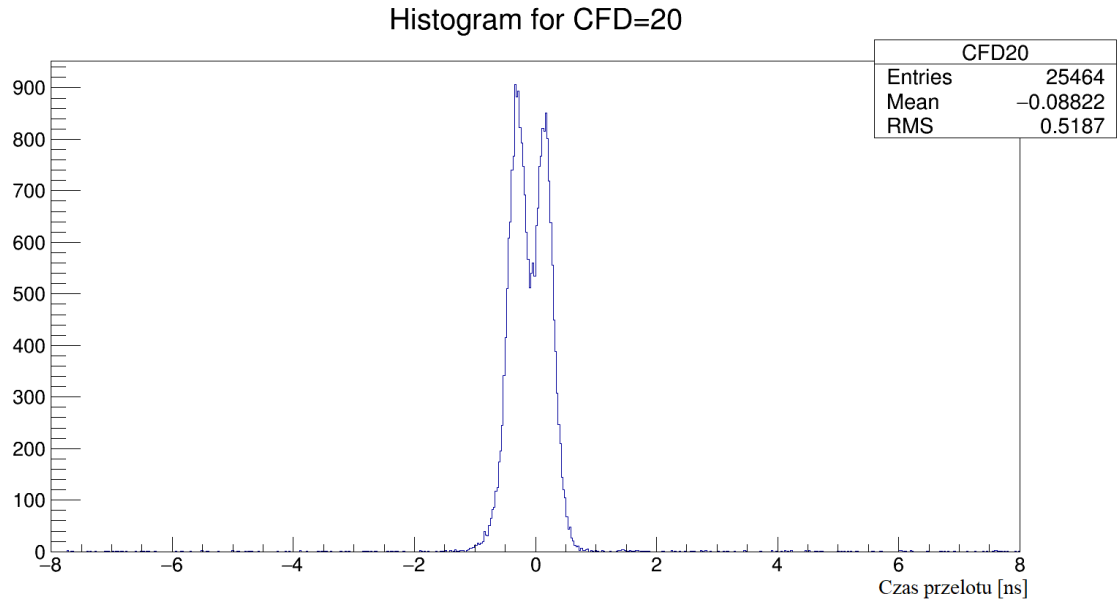


Rysunek 11: Rozkład szerokość rozkładu różnicy czasów dla dyskryminatora LED (lewy rysunek) i CFD (prawy rysunek).

Następnie próbowano zobaczyć, jak zmieniają się optymalne wartości dyskryminatorów dla różnych wartości pędu wiązki (wyniki umieszczono w Tabeli 1). Patrząc na wyniki trudno mówić o jakiejś prawidłowości zmian dyskryminatorów przy zmianie pędu wiązki. Występują tu raczej oscylacje w okolicy określonej wartości. Analizując Rysunek 12 widać, że rozdzielczość detektora nie wystarcza na dobre rozseparowanie protonów i mionów. Na szerokość rozkładu ma wpływ nie tylko sam moduł DRS, ale także scyntylatory, to jest rozdzielczość całego detektora.

Tabela 1: Wartości pędu wiązki i odpowiadające im wartości dyskryminatorów, wybranych tak, aby osiągnąć najmniejszą szerokość rozkładu.

Pęd [GeV/c]	LED [V]	CFD [%]
2	20	15
3	21	16
4	22	16
5	18	13
6	18	14



Rysunek 12: Rozkład różnicy czasów sygnałów dla 20% maksimum (CFD), dla danych uzyskanych dla pędu wiązki 6 GeV/c.

Następnie w celu sprawdzenia spójności uzyskanych wyników zdecydowano się wyznaczyć odległość między scyntylatorami L (Rysunek 2). W tym celu najpierw wypisano wzór na różnicę czasu przelotu mionów i protonów:

$$\begin{aligned}\Delta t &= L \left(\frac{1}{v_p} - \frac{1}{v_\mu} \right) = \frac{L}{c} \left(\frac{1}{\beta_p} - \frac{1}{\beta_\mu} \right) = \frac{L}{pc^2} (E_p - E_\mu) = \\ &= \frac{L}{pc^2} \left(\sqrt{p^2 c^2 + m_p^2 c^4} - \sqrt{p^2 c^2 + m_\mu^2 c^4} \right).\end{aligned}\quad (1)$$

Przekształcając otrzymujemy:

$$L = \frac{\Delta t p c^2}{\sqrt{p^2 c^2 + m_p^2 c^4} - \sqrt{p^2 c^2 + m_\mu^2 c^4}}, \quad (2)$$

gdzie: p jest pędem wiązki, m jest masą ($m_p=938$ MeV/c², a $m_\mu=106$ MeV/c² [5]), c to prędkość światła w próżni, a Δt to różnica czasu przelotu protonu i mionu przez scyntylatory. Do rozkładu czasu przelotu (optymalna wartość CFD) dopasowano Gaussa dla piku protonu i oddzielnie dla mionu. Wartość średnia dopasowania będzie czasem przelotu t_i ($i = p, \mu$), a szerokość rozkładu będzie niepewnością σ_{t_i} . Obliczone wartości umieszczono w Tabeli 2.

Tabela 2: Wartości różnicy czasu przelotu protonu i mionu Δt oraz odległość między scyntylatorami L .

	Pęd 2 [GeV/c]	Pęd 3 [GeV/c]	Pęd 4 [GeV/c]
Δt [ns]	3.5 ± 0.26	1.3 ± 0.22	0.45 ± 0.23
L [m]	10 ± 0.76	8.1 ± 1.3	5.0 ± 2.5

Średnia odległość między scyntylatorami wynosi 7.7 ± 1.5 [m].

Podsumowanie

W ćwiczeniu udało się pokazać kroki pozwalające osiągnąć wartości dyskryminatorów do optymalnej pracy w przypadku realizacji programowej. Optymalna praca dyskryminatorów to taka, gdzie szerokość rozkładu różnicy czasu przelotu jest najmniejsza. Przykładowo dla układu przedstawionego na Rysunku 2 o pędzie wiązki 2 GeV/c wartości te wynoszą: 20 V dla LED i 15 % dla CFD. Obliczono także odległość między scyntylatorami, która wynosi 7.7 ± 1.5 [m].

Literatura

- [1] Strona internetowa eksperymentu NA61/Shine, dostępne w: <http://shine.web.cern.ch/node/8>, dostęp dnia: 4.01.2018 r.
- [2] N. Abgrall et. al., *NA61/SHINE facility at the CERN SPS: beams and detector system*, arXiv:1401.4699.
- [3] wikipedia.org, dostępne w: https://en.wikipedia.org/wiki/Constant_fraction_discriminator, dostęp dnia: 2.01.2018 r.
- [4] P. Podlaski, *DRS readout of Forward Time of Flight*, materiały z konferencji NA61/SHINE Collaboration Meeting at CERN z dnia 9.09.2017.
- [5] C. Patrignani et al. (Particle Data Group), Chin. Phys. C, 40, 100001 (2016).