

# Poszukiwanie przypadków produkcji cząstek ciemnej materii w zderzeniach $e^+e^-$ .

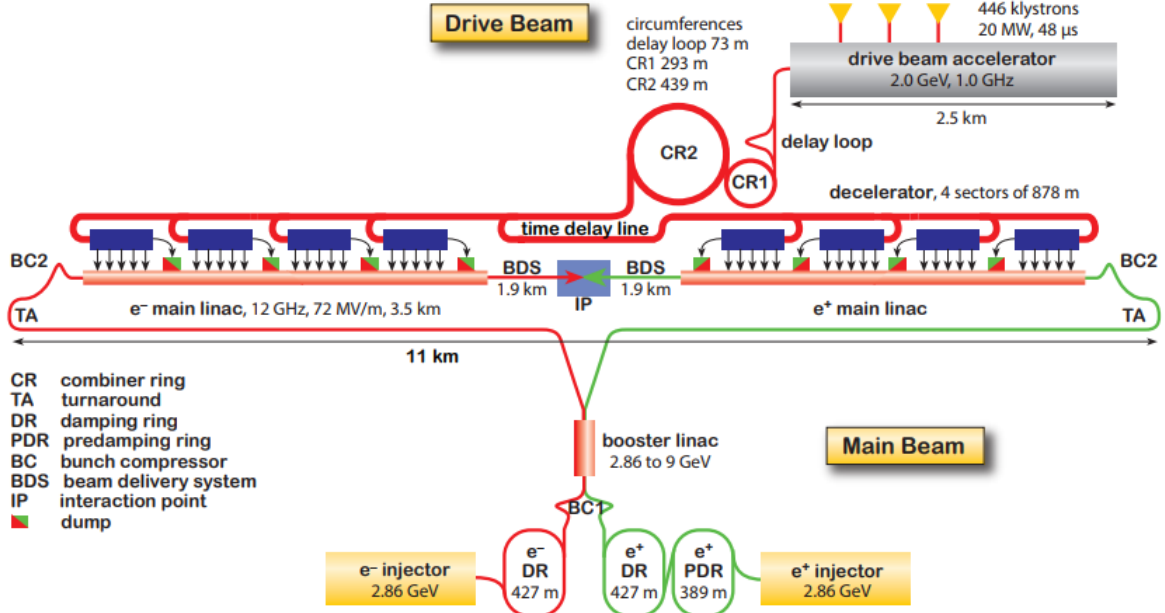
Kamil Skwarczyński

## Streszczenie

Celem ćwiczenia było zaproponowanie cięć umożliwiających selekcję przypadków z zabronionymi (w ramach Modelu Standardowego) rozpadu kwarku  $t$ . Jednym z takich jest rozpad z produkcją cząstek ciemnej materii  $t \rightarrow C + DM$ . Tłem dla poszukiwanego kanału były powstałe ze zderzenia  $e^+e^-$ , 2 kwarki  $t$  (tło  $t\bar{t}$ ), 2 bozony  $W$  (tło  $WW$ ) oraz 2 bozony  $Z$  (tło  $ZZ$ ). Udało się znaleźć cięcie, które efektywnie działa dla sygnału z produkcją cząstek ciemnej materii o masie 125, 150 GeV. Cięcie to redukuje poziom tła o efektywności na poziomie 0 – 0.72% (redukcja o czynnik ok. 140), a sygnał zachowuje się na poziomie 21 – 42 %.

## Wstęp

Eksperyment CLIC (*The Compact Linear Collider*) jest międzynarodowym eksperymentem, którego budowa planowana jest w CERN-ie. CLIC będzie badać kolizje elektronów i pozytonów. Głównym celem eksperymentu w pierwszej jego fazie (energia zderzenia 380 GeV) będzie badanie Bozonu Higgsa, jak i kwarków  $t$ . Schemat akceleratora CLIC znajduje się na Rysunku 1.



Rysunek 1: Przegląd akceleratora CLIC dla  $\sqrt{s}=380$  GeV [1].

Zgodnie z modelem standardowym w wyniku kolizji  $e^+e^-$  zachodzą następujące procesy:

$$e^+e^- \rightarrow t\bar{t}, \quad e^+e^- \rightarrow W^+W^-, \quad e^+e^- \rightarrow Z^0Z^0. \quad (1)$$

Kwark  $t$  prawie zawsze rozpada się w kanale:

$$t \rightarrow bW^+. \quad (2)$$

Bozony  $W$  rozpadają się na 2 lekkie (anty)kwarki czyli  $u$ ,  $d$ ,  $s$ . Z uwagi na to, że (anty)kwarki  $u$ ,  $d$ ,  $s$  mają na tyle małe i zbliżone masy, że nie jesteśmy w stanie ich rozróżnić, dlatego określamy je zbiorczo jako lekkie kwarki. W przypadku istnienia cząstek ciemnej materii o masie poniżej masy kwarku  $t$  mogłyby one także ulegać rozpadowi:

$$t \rightarrow c + DM. \quad (3)$$

W wyniku tego rozpadu powstają cząstki ciemnej materii ( $DM$ ), które są stabilne i nie mogą być zaobserwowane w detektorze CLIC.

## Wstępna analiza danych

Korzystano z danych wysymulowanych metodą Monte Carlo.

Przyjęto, że detektor jest w stanie w 70% przypadków dobrze rozróżnić kwark  $b$  lub  $\bar{b}$  od pozostałych kwarków, a w 2% przypadków traktuje kwark  $c$  lub  $\bar{c}$  jak kwark  $b$ , natomiast lekkie kwarki w 0.2% przypadków są traktowane jak kwark  $b$ . Przyjęto rozmycie Gaussowskie energii takie że:

$$\sigma_E = \begin{cases} \frac{50}{\sqrt{E}} \frac{\text{GeV}^{3/2}}{\text{GeV}} & \text{dla } E < 100 \text{ GeV} \\ 5 & \text{dla } E > 100 \text{ GeV}. \end{cases} \quad (4)$$

Założono, że kierunek jetów się nie rozmywa, ale pęd skaluje się jak energia. Oznacza to, że pęd zmienia się o taki procent, jaki stanowi energia rozmyta względem wartości nierozmytej. Zastosowano też cięcie kątowe czyli takie, że  $|\cos(\theta)| < 0.995$  dla leptonów i  $|\cos(\theta)| < 0.975$  dla jetów, gdzie  $\theta$  jest kątem między torem cząstki a wiązką [2] .

## Próba wyselekcjonowania sygnału od tła

Spodziewaną topologią zdarzenia są 4 jety: jeden  $c$  powstały z rozpadu ze wzoru (3) oraz jet  $b$  i dwa lekkie kwarki z rozpadu ze wzoru (2). Dlatego podstawowym warunkiem selekcji było żądanie 4 jetów, w tym jednego  $b$ . Pozwoliło to na pozbycie się z tła tt: przypadków hadronowych (6 jetów) oraz przypadków z 2 jetami i 2 leptonami. Pozostały tzw. przypadki półleptonowe (4 jety + lepton). Ponieważ zakładamy tylko "znakowanie" zapachu kwarku  $b$  ( $b$ -taging) to kwarki  $c$  i  $\bar{c}$  są nierozróżnialne od lekkich kwarków. Ponieważ są 3 kwarki NB(non  $b$ ) to obliczono 3 kombinacje mas dwóch kwarków. Wybrano takie kombinacje, których masa znajduje się w przedziale 70-90 GeV. Następnie żądano, aby masa tylko jednej kombinacji była w tym przedziale.

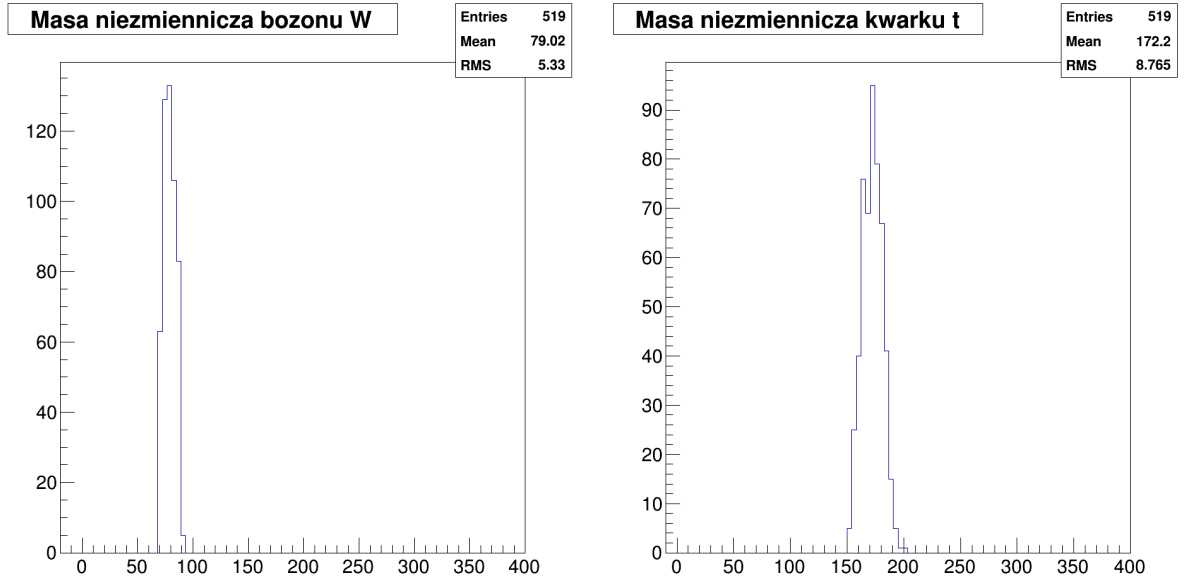
Wszystkie wartości podane poniżej są w GeV-ach przy założeniu, że  $\hbar=c=1$ , ale dla wygody nie stosowano ich w tekście.

Cięciem, które pozwoliło wyselekcjonować sygnał od tła WW i ZZ jest żądanie, aby pęd poprzeczny wszystkich kwarków był większy równy od 30 oraz żeby masa dwóch kwarków składających się na bozon  $W$  i jednego kwarka  $b$  (czyli kwark  $t$ ) znajdowała się w przedziale 150-200. Znalezienie cięcia dla tła tt było trudniejsze. Oprócz opisanych wyżej cięć trzeba było zastosować następujące cięcia: pęd poprzeczny wszystkich kwarków mniejszy od 80; masa kwarków NB w przedziale 90-140 oraz ich energia mniejsza równa 160; energia wszystkich kwarków mniejsza równa 250; energia trzeciego kwarka (kwark NB, który nie składa się na masę  $W$ ) w przedziale 10-60, jego

pęd poprzeczny mniejszy równy 50, a masa mniejsza równa 5. Stosunek danych po cięciach do sytuacji przed cięciami (liczby po zastosowaniu cięć pierwotnych czyli żądania 4 jetów, w tym 1  $b$ ) przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1: Procent, jaki pozostał z początkowych danych po zastosowaniu cięć dla danych sygnału o różnych masach cząstek ciemnej materii  $DM$  w GeV i danych tła.

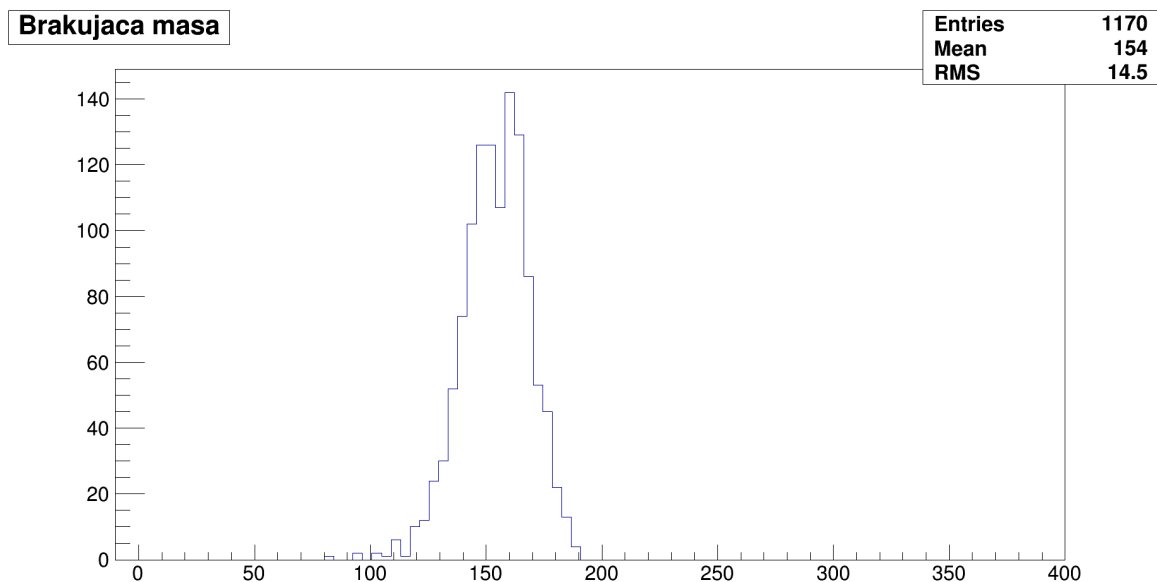
Typ danych	Selekcja [%]
Sygnał DM50	0.72
Sygnał DM75	1.9
Sygnał DM100	6.7
Sygnał DM125	21
Sygnał DM150	42
Tło $tt$	0.72
Tło $WW$	0.0
Tło $ZZ$	0.015



Rysunek 2: Masy niezmiennicze bozonu  $W$  oraz kwarku  $t$  dla sygnału o masie cząstki ciemnej materii równej 125 GeV.

Na lewym wykresie Rysunku 2 pokazano masę lekkich kwarków, które powstały z rozpadu bozonu  $W$  (masa ok. 80 GeV [3]). Na prawym wykresie Rysunku 3 zobraowano masę kwarku  $t$  (masa ok. 173 GeV [3]).

Porównując obydwa wykresy z podanymi wyżej masami widać, że średnia rozkładu jest bardzo bliska wartościom obecnie znanym, szerokość obu rozkładów równa się ok. 8 GeV. Analizując Rysunek 3 (dane dla masy ciemnej materii 150 GeV) zauważyć można brakującą masę równą 154 GeV. Podsumowując, udało się poprawnie zrekonstruować masy odpowiednich produktów rozpadu, co pokazuje, że sygnał nie został wycięty w zbyt agresywny sposób. Problemem tych cięć jest to, że sygnał dla masy cząstki ciemnej materii poniżej 125 GeV jest prawie w całości wycięty. Dlatego dokonano próby znalezienia innego zbioru cięć tak dobranych, aby wyselekcjonować sygnał dla mniejszych cząstek ciemnej materii.



Rysunek 3: Brakująca masa dla sygnału o masie cząstki ciemnej materii równej 150 GeV.

Tymi samymi cięciami co wcześniej są: pęd poprzeczny wszystkich kwarków w przedziale 30-80 oraz żeby masa dwóch kwarków składających się na bozon  $W$  i jednego kwarka  $b$  (czyli kwark  $t$ ) znajdowała się w przedziale 150-200; masa trzeciego kwarka

(kwark NB, który nie składa się na masę  $W$ ) mniejsza równa od 5. Dodatkowymi cięciami są: energia trzeciego kwarka większa równa 70, a jego pęd poprzeczny większy równy 70 oraz brakująca masa mniejsza równa 70. Stosunek danych po cięciach do sytuacji przed cięciami (liczby po zastosowaniu cięć pierwotnych czyli żądania 4 jetów, w tym 1  $b$ ) przedstawiono w Tabeli 2.

Tabela 2: Procent, jaki pozostał z początkowych danych po zastosowaniu drugiego zbioru cięć dla danych sygnału o różnych masach cząstek ciemnej materii  $DM$  w GeV i danych tła.

Typ danych	Selekcja [%]
Sygnał DM50	20
Sygnał DM75	8.0
Sygnał DM100	0.34
Sygnał DM125	0.0
Sygnał DM150	0.0
Tło $tt$	1.6
Tło $WW$	0.0
Tło $ZZ$	0.030

Porównując efekty cięć ujętych w Tabelach 1 i 2 widać, że sytuacja w wynikach tych cięć jest odwrotna. W dużej mierze wynika to z zastosowania cięcia na brakującą masę w przypadku drugiego zbioru cięć (Tabela 2) .

### Podsumowanie

Badając produkty zderzenia  $e^+e^-$ , udało się znaleźć cięcie pozwalające odróżnić tło  $tt$ ,  $WW$  i  $ZZ$  od sygnału, w którym powstają nierejestrowane cząstki ciemnej materii. Proponowane cięcia to:

- pęd poprzeczny wszystkich kwarków był w przedziale 30-80 GeV,
- masa dwóch kwarków dających masę  $W$  i 1  $b$  (czyli kwark  $t$ ) była w przedziale 150-200 GeV,
- masa kwarków NB w przedziale 90-140 GeV,
- energia kwarków NB mniejsza równa 160 GeV,
- energia wszystkich kwarków mniejsza równa 250 GeV,

- energia trzeciego kwarka w przedziale 10-60 GeV,
- masa trzeciego kwarka mniejsza równa 5 GeV,
- pęd poprzeczny trzeciego kwarka mniejszy równy 50 GeV.

Proponowane cięcie wycina tło w przedziale 0.0015 % - 0.72 % w zależności od próbki tła. Cięcie to jest efektywne dla sygnału, w którym powstaje cząstka ciemnej materii o masie 125 i 150 GeV, dla których mamy kolejno 21 % i 42 % po redukcji.

Znaleziono też cięcia skupione dla odróżnienia sygnału o mniejszych masach ciemnej materii. W wyniku tych cięć sygnał o masie DM 50 GeV zachowuje się na poziomie 20%, a tło w przedziale 0 – 1.6 %.

## Literatura

- [1] CLICdp collaboration, *Updated baseline for a staged Compact Linear Collider* arXiv:1608.07537.
- [2] Aleksander Filip Zarnecki, *Searching for top FCNC decay  $t \rightarrow ch$  at future  $e^+e^-$  colliders* Seminarium 12.06.2015.
- [3] C. Patrignani et al. (Particle Data Group), Chin. Phys. C, 40, 100001 (2016) and 2017 update.