

Kalibracja energii z bliskiego detektora w eksperymencie MINOS+

Kamil Skwarczyński

Streszczenie Monte Carlo (MC) nie zgadzało się ze zrekonstruowaną energią w bliskim detektorze eksperymentu MINOS+, wyglądało jakby było przesunięte o pewne stałe parametry. Dlatego zdecydowano się znaleźć poprawkę liniową do energii MC ($a * E + b$), aby lepiej odzwierciedlało dane z bliskiego detektora. Napisano program, który znajduje te parametry. Różnica między danymi a MC po poprawce liniowej jest na poziomie 1-2 χ^2/ndf , co bardzo dobrze pokrywa się z danymi. Znalaziono parametry dla trzech zestawów cięć i dwóch zakresów energii. Wybór cięć ma wpływ na jakość dopasowania, natomiast jeśli chodzi o zakres energii to można korzystać z poprawki bez dużej straty jakości dopasowania dla wyższych energii.

Opis eksperymentu MINOS+

Eksperyment MINOS+ jest bezpośrednią kontynuacją eksperymentu MINOS (*the Main Injection Neutrino Oscillation Search*). MINOS+ jest to akceleratorowy eksperyment badający oscylację neutrin (schemat przedstawiono na Rysunku 1). Wiązka neutrin jest produkowana w NuMI (*Neutrinos at the Main Injector*), które znajduje się w Fermilabie, niedaleko Chicago. Bliski detektor badający neutrina przed zajściem oscylacji znajduje się 1.04 km od miejsca produkcji. Wiązka neutrin mionowych przelatuje przez kopalnię Soudan w północnej części Minnesoty. Tam badane są neutrina w dalekim detektorze już po zajściu oscylacji. Natomiast odległość między bliskim a dalekim detektorem wynosi 735 km.

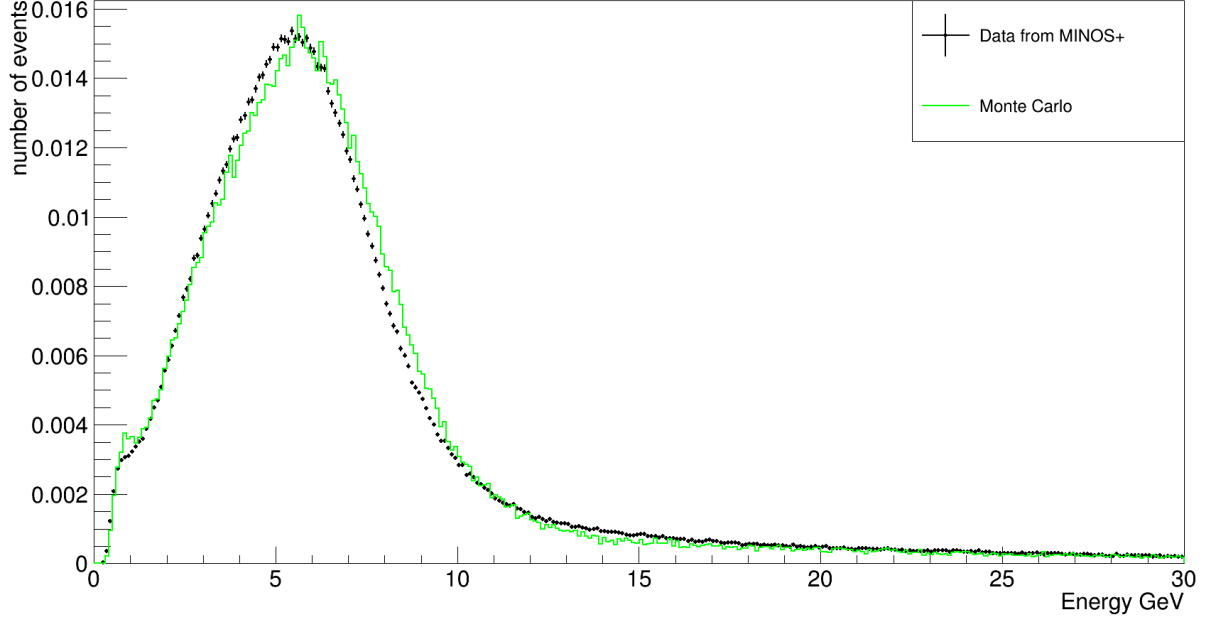


Rysunek 1: Schemat eksperymentu MINOS. Wiązka neutrin mionowych produkowana jest w Fermilabie. Neutrina przechodzą przez bliski detektor w Fermilabie i daleki detektor w kopalni Soudan w Północnej Minnesocie [1].

Monte Carlo a dane w bliskim detektorze

Rysunek 2 przedstawia zrekonstruowaną energię w bliskim detektorze MINOS+, jak i Monte Carlo (MC). Widać, że Monte Carlo nie zgadza się z danymi z eksperymentu, a dokładniej wygląda to tak, jakby było przesunięte. Nie wiadomo, z czego może wynikać ta różnica [2]. W przypadku istnienia tylko trzech zapachów neutrin wyniki doświadczalne powinny zgadzać się z MC. Jeśli istnieją neutrina sterylne to

oscylacje byłyby widoczne w bliskim detektorze. Jednak efekt ten wyglądałby inaczej, rozkład energii uległby modyfikacji zgodnej z oscylacyjnym zachowaniem. Z uwagi na rozbieżności między danymi a MC zdecydowano się znaleźć poprawkę liniową do energii, aby MC lepiej zgadzało się z danymi.



Rysunek 2: Zrekonstruowana energia w bliskim detektorze eksperymentu MINOS+ oraz Monte Carlo, znormalizowane do 1.

Poszukiwanie parametrów dopasowania

Poszukiwano poprawek liniowych energii ($a * E + b$), poprzez minimalizację wielkości:

$$\sum_i \frac{(D_i - MC_i)^2}{\sigma_{Di}^2}, \quad (1)$$

gdzie D_i to i-ty bin danych, MC_i to i-ty bin Monte Carlo, a σ_{Di} to błąd i-tego binu danych. Poszukiwano parametrów dla trzech zestawów cięć, wszystkie musiały mieć dobrze zrekonstruowany tor (goodtrack):

1. Energia < 8 GeV,
2. Energia < 8, Energia > 2 GeV oraz długość toru > 40,

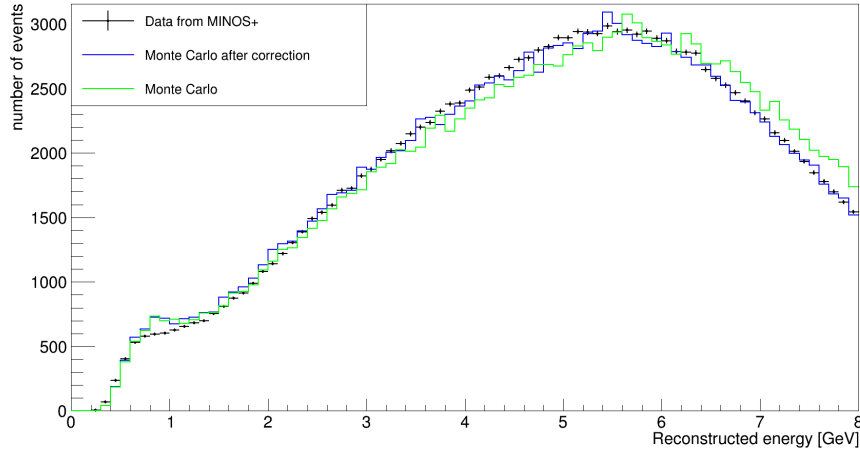
3. Energia < 8, szerokość kaskady hydronowej ≤ 3 , długość toru > 20, ładunek cząstki < 0, kulistość < 0.1, zmienna mówiąca o tym, czy tor bardziej wygląda jak pion czy jak mion < 15 ale > 0.

Do minimalizacji skorzystano z algorytmów z biblioteki TMinuit.

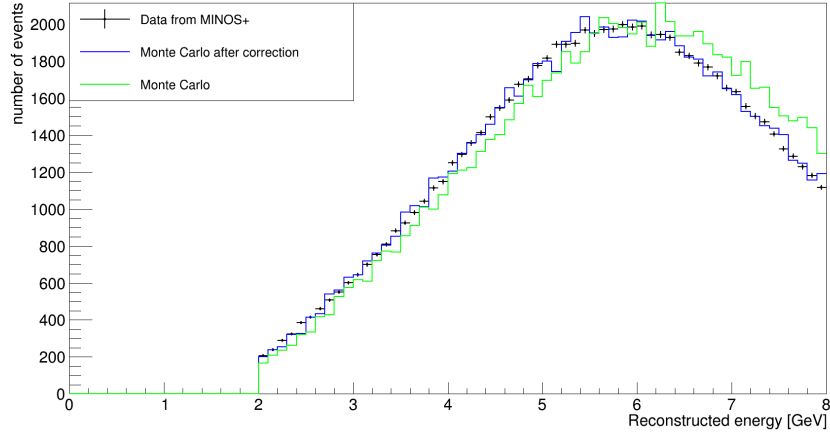
Uzyskane parametry dla kolejnych zestawów cięć to:

1. $a=0.961158 \pm 0.00000086$, $b=0.0148854 \pm 0.00000045$, $\chi^2/\text{ndf}=2.3$.
2. $a=0.954287 \pm 0.00000040$, $b=0.0149952 \pm 0.00000081$, $\chi^2/\text{ndf}=0.80$.
3. $a=0.943494 \pm 0.00000080$, $b=0.004500 \pm 0.000036$, $\chi^2/\text{ndf}=0.94$.

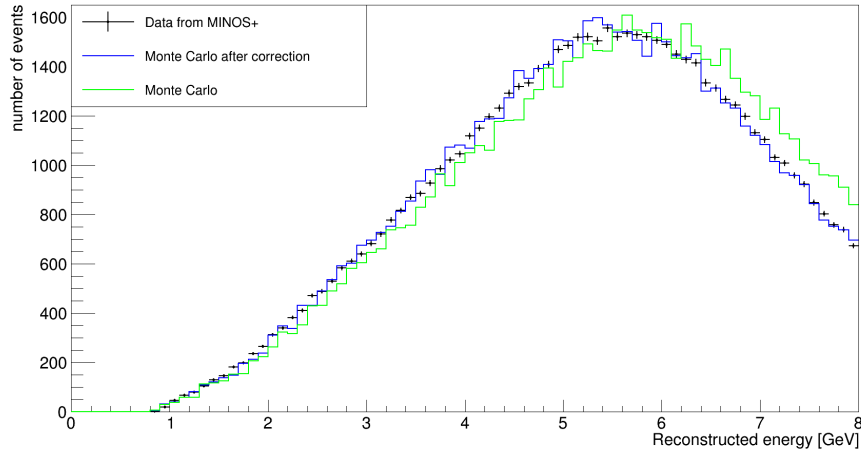
Rezultaty cięć przedstawiono dla kolejnych zestawów cięć na Rysunkach 3, 4, 5. Widać, że jakość dopasowania zależy od zestawu cięć. Szczególnie jest to widoczne dla pierwszego zestawu. Pierwszy zestaw jest najmniej inwazyjny i w nim pozostaje "garb" w okolicy 1 GeV, co źle wpływa na jakość dopasowania.



Rysunek 3: Zależność liczby przypadków od energii (GeV) dla danych z bliskiego detektora MINOS+ (punkty), Monte Carlo (zielona linia) oraz Monte Carlo po zastosowaniu poprawki (niebieska linia) dla pierwszego zestawu cięć.



Rysunek 4: Zależność liczby przypadków od energii (GeV) dla danych z bliskiego detektora MINOS+ (punkty), Monte Carlo (zielona linia) oraz Monte Carlo po zastosowaniu poprawki (niebieska linia) dla drugiego zestawu cięć.

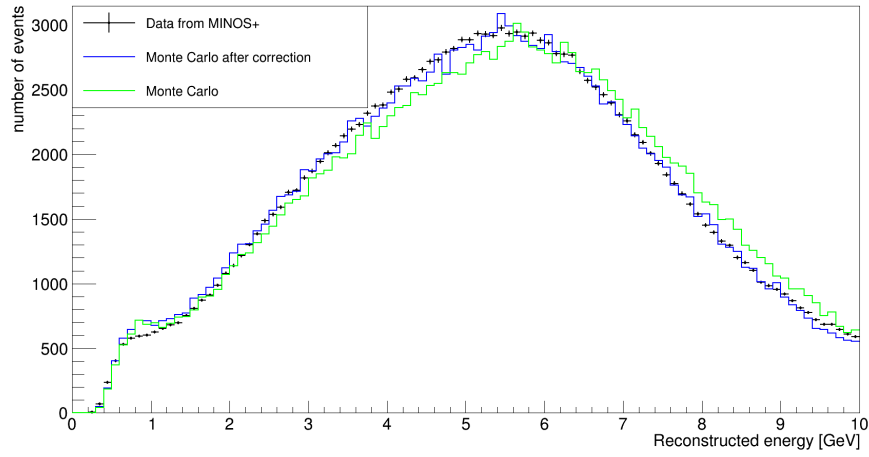


Rysunek 5: Zależność liczby przypadków od energii (GeV) dla danych z bliskiego detektora MINOS+ (punkty), Monte Carlo (zielona linia) oraz Monte Carlo po zastosowaniu poprawki (niebieska linia) dla trzeciego zestawu cięć.

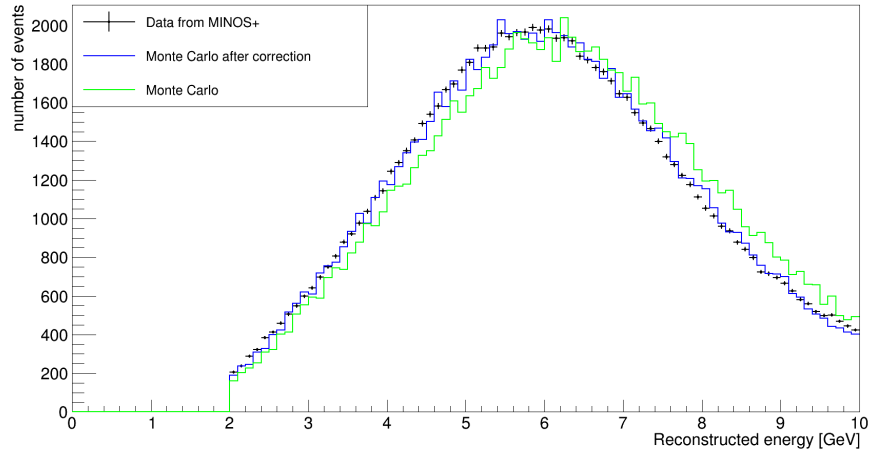
Postanowiono zobaczyć, jak wygląda dopasowanie dla większych energii. Poniższe wyniki są dla takich samych zestawów cięć jak wyżej, tylko zakres energii zwiększo-

no do 10 GeV. Natomiast wyniki po zastosowaniu tej poprawki przedstawiono na Rysunkach 6, 7, 8.

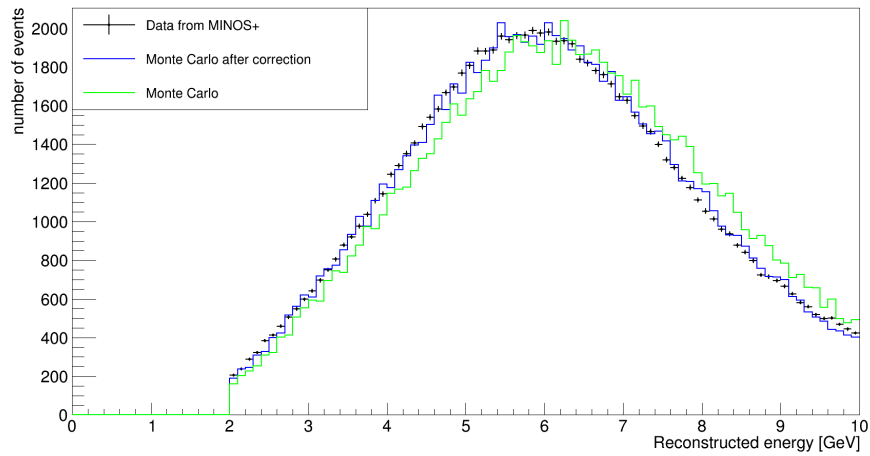
1. $a=0.962539\pm0.00000063$, $b=0.0098694\pm0.0000012$, $\chi^2/\text{ndf}=2.1$.
2. $a=0.960001\pm0.00000043$, $b=0.0163533\pm0.0000064$, $\chi^2/\text{ndf}=1.1$.
3. $a=0.95670\pm0.000017$, $b=0.001558\pm0.000084$, $\chi^2/\text{ndf}=1.2$.



Rysunek 6: Zależność liczby przypadków od energii (GeV) dla danych z bliskiego detektora MINOS+ (punkty), Monte Carlo (zielona linia) oraz Monte Carlo po zastosowaniu poprawki (niebieska linia) dla pierwszego zestawu cięć.



Rysunek 7: Zależność liczby przypadków od energii (GeV) dla danych z bliskiego detektora MINOS+ (punkty), Monte Carlo (zielona linia) oraz Monte Carlo po zastosowaniu poprawki (niebieska linia) dla drugiego zestawu cięć.



Rysunek 8: Zależność liczby przypadków od energii (GeV) dla danych z bliskiego detektora MINOS+ (punkty), Monte Carlo (zielona linia) oraz Monte Carlo po zastosowaniu poprawki (niebieska linia) dla trzeciego zestawu cięć.

Widać, że zwiększając zakres energii z 8 GeV do 10 GeV nie ryzykujemy dużym spadkiem jakości dopasowania.

Podsumowanie

Podsumowując, za pomocą dopasowania liniowego do energii MC ($a * E + b$) udało się doprowadzić do zgodności Monte Carlo z danymi z bliskiego detektora. W zależności od wyboru zestawu cięć, zgodność ta jest na poziomie 1-2 χ^2/ndf . Różnica ta wynika z "garba", który jest w najmniej inwazyjnym zestawie cięć (pierwszy zestaw). Znalezione parametry dla trzech zestawów cięć i dwóch zakresów energii (8 i 10 GeV). Jeśli chodzi o parametry dopasowania to były one zbliżone do siebie. Natomiast jeśli chodzi o zakres energii, to zwiększając go z początkowych 8 GeV do 10 GeV nie tracimy dużo na jakości dopasowania.

Literatura

- [1] A. M. Timmons, *Search for Sterile Neutrinos with the MINOS Long-Baseline Experiment*, Springer International Publishing.
- [2] L. Aliaga et. al., *Neutrino Flux Predictions for the NuMI Beam*, arXiv:1607.00704.