

Produkce Z bosonu v simulovaných p+p srážkách

Kateřina Hermannová¹, Nikola Hlom², Petr Sluka³

¹G J. Bořka, Český Těšín; hermannova.katerina@gmct.cz

²G Pelhřimov; hlom.vik@gmail.com

³G Plzeň, Mikulášské nám. 23; petr@sluka.cz

Miroslav Myška, Ota Zaplatílek; FJFI ČVUT

Abstrakt

Tato práce se zabývá proton-protonovými srážkami za vzniku Z bosonu a jeho následnými rozpady, zejména $\mu^+\mu^-$. Příslušné reakce jsou simulovány pomocí metody Monte Carlo a programu Herwig7. Analýzou dat a fitováním vhodných křivek byla zjištěna hodnota hmoty Z bosonu a srovnána s veřejně dostupnými daty.

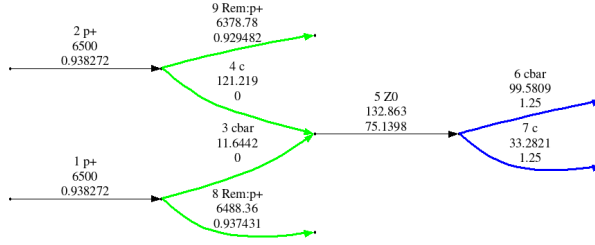
1 Úvod

Již starověcí filosofové se zabývali otázkou, zda je hmota spojitá, či má nějakou vnitřní strukturu. Honba za nejmenšími částicemi vedla v průběhu 70. let až ke konstrukci Standardního Modelu částicové fyziky, v němž se podařilo popsat složení hmoty pomocí kýžených elementárních částic a sjednotit tři ze čtyř fundamentálních interakcí, a sice interakci silnou, slabou a elektromagnetickou. V současné době se do skupiny elementárních částic řadí kvarky - objekty vázané do struktur hadronů, z nichž jsou nepochybně nejznámější protony (o kvarkovém složení uud) a neutrony (udd). Do hmoty dále přispívají leptony, ke kterým patří i elektron, avšak v této práci se budeme zabývat především jejich druhou generací, miony. Pro náležitý popis je také třeba uvést tzv. částice pole, bosony - a mezi nimi zkoumaný Z boson.

Různé bosony také odpovídají příslušným popsaným interakcím. Silná interakce je zodpovědná za uvěznění kvarků v hadronech a je propagována gluony. Slabá interakce se ukazuje například v β^- rozpadu - Z boson je jedním z jejich propagátorů. Dále se zde nabízí interakce elektromagnetická, jež působí na veškeré nabitě částice a jsou za ni odpovědné fotony. Poslední interakci, gravitační, se dosud nepodařilo do Standardního modelu zahrnout.

2 Generování srážek

Konkrétně jsme zkoumali srážku p+p a jejich přeměnu na Z boson viz Obr. 1. Výpočty jsou založené na nejnižším řádu poruchového rozvoje. Vygenerovali jsme 50 000 událostí pomocí Monte Carlo (MC) generátoru Herwig7 [2] a následně je analyzovali pomocí balíčku [3]. V simulačním programu jsme zkoumali $p+p$ srážku, kde vzniká Z boson a ten se následně rozpadá na pár fermionů, $\mu^+\mu^-$. U fermionů jsme v programu zapnuli rozpad jen na pár $\mu^+\mu^-$ [1]. Z naměřených čtyřhybností dvou vedoucích leptonů, $P_1 = (E_1, \vec{p}_1)$ a $P_2 = (E_2, \vec{p}_2)$, jsme zrekonstruovali čtyřhybnost původní částice $P_Z = (E_1 + E_2, \vec{p}_1 + \vec{p}_2)$, ze které pár $\mu^+\mu^-$ vznikl.



Obrázek 1: Vizualizace srážky dvou protonů pomocí programu Herwig7, kde se anihilací dvou mořských charm kvarků tvoří námi pozorovaný Z boson, jenž zaniká rozpadem na další pár c kvarku a antikvarku. Následné procesy pro hadronizaci a tzv. underlying event jsme pro účel tohoto obrázku deaktivovali.

2.1 Hmotnost Z bosonu

Hmotnost Z bosonu m_Z jsme určili z následujícího relativistického vztahu mezi energií a hybností

$$E_Z^2 = m_Z^2 c^4 + \vec{p}_Z^2 c^2. \quad (1)$$

Hmotnostní spektrum Z bosonu zobrazené na Obr. 2, které jsme proložili Gaussovou a Breit-Wiegenerovou křivkou, definovanou následujícími vzorci:

$$\text{Gauss}(x; A, \mu, \sigma) = A \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

$$\text{Breit-Wiegener}(x; A, \Gamma, x_0) = A \frac{\frac{\Gamma}{2}}{\left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2 + (x - x_0)^2}, \quad (3)$$

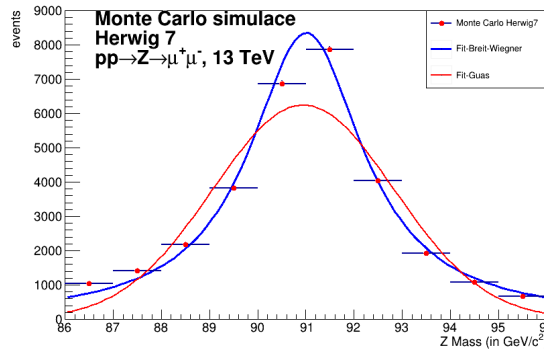
přičemž hmotu bosonu jsme vyčetli z maxima Gaussovy křivky (4) a B-W křivky (5).

$$m_Z^{\text{Gauss}} = (90.94 \pm 0.01) \text{ GeV}, \quad (4)$$

$$m_Z^{\text{BW}} = (91.00 \pm 0.01) \text{ GeV}. \quad (5)$$

Pro porovnání uvádíme tabulkovou hodnotu hmotnosti Z bosonu z Particle Data Group booklet [4]

$$m_Z^{\text{PDG}} = (91.1876 \pm 0.0021) \text{ GeV}.$$



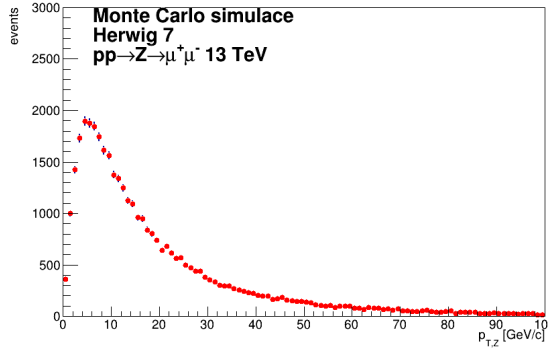
Obrázek 2: Spektrum hmotností Z bosonu proložené Gaussovou a Breit-Wiegenerovou křivkou.

2.2 Příčná hybnost

Příčná hybnost je Lorentzovsky invariantní veličina popsaná vztahem

$$p_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}, \quad (6)$$

je kolmá na srážku a její důležitost spočívá v tom, že na rozdíl od složky hybnosti p_z , kde mohou být částice pozůstatkem ze směsice kolem protonu, která nezinteraguje a proletí dál ve směru srážky, hybnost p_T je vždy u částic, co spolu interagují. Na Obr. 3 lze vidět, že spektrum příčné hybnosti exponenciálně klesá.



Obrázek 3: Spektrum příčné hybnosti $p_{T,Z}$ získané generátorem MC a programem Herwig7.

2.3 Rapidita

Rapidita y je Lorentzovsky invariantní kinematická veličina, definovaná vztahem (7) pomocí energie E a podélné z složky hybnosti p_z naší částice. Zjednodušeně řečeno je to úhlová veličina, která popisuje, do jaké části detektoru částice nalétává. Při hodnotách rapidity blízkých se nule částice letí do centrální části detektoru a v případě, že se její rapidita blíží k nekonečnu, směřuje ve směru osy srážky (k z-ose)

$$y = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{E + p_z c}{E - p_z c} \right). \quad (7)$$

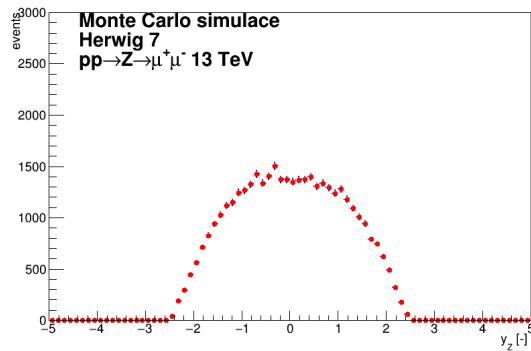
Dle Obr. 4 Z boson detekujeme v centrální části detektoru.

2.4 Lagrangián

Interakce zkoumaného Z bosonu Z_μ s fermiony $\mu^+ \mu^-$ lze popsat pomocí interakčního lagrangiánu z rovnice

$$\mathcal{L}_{\text{int}}^{\text{NC}} = \frac{g}{2 \cos \theta_W} \psi \gamma^\mu (v - a \gamma_5) \psi Z_\mu, \quad (8)$$

kde $\frac{g}{2 \cos \theta_W}$ je vazbová konstanta (čím větší je, tím významnější je interakce). Dále ψ je vlnová funkce fermionu, Z_μ je vlnová funkce Z bosonu a γ^μ, γ_5 jsou gamma matice. Algebraická struktura $\gamma^\mu (v - a \gamma_5)$ je důsledkem netriviální asymetrie mezi levotočivým a pravotočivým světem v slabých interakcích s naším zkoumaným Z bosonem.



Obrázek 4: Spektrum rapidity y_Z generované metodou MC a programem Herwig7.

3 Shrnutí

Seznámili jsme se se základy Standardního Modelu, vyzkoušeli si práci s MC generátorem Herwig 7 s jehož pomocí jsme určili hmotu Z bosonu

$$m_Z^{\text{BW}} = (91.00 \pm 0.01) \text{ GeV.}$$

Poděkování

Rádi bychom poděkovali organizátorům TV@J, našim garantům Ing. Miroslavovi Myškovi, PhD. a Ing. Otovi Zaplatílkovi za odborné vedení a výklad o tématu.

Odkazy

1. HERWIG7, kolektiv autorů. *matrix element for $q \bar{q}$ to Standard Model fermions via Z and photon exchange*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://herwig.hepforge.org/doxygen/MEqq2gZ2ffInterfaces.html>.
2. HERWIG7, kolektiv autorů. *The Herwig Event Generator*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://herwig.hepforge.org/index.html#>.
3. ZAPLATÍLEK, O. *Týden Vědy - generování Z bosonu*. [B.r.]. Dostupné také z: https://gitlab.cern.ch/ozaplati/TydenVedy/-/tree/master?ref_type=heads.
4. GROUP, P. D. et al. Review of Particle Physics. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*. 2020, roč. 2020, č. 8, s. 083C01. ISSN 2050-3911. Dostupné z DOI: [10.1093/ptep/ptaa104](https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa104).