

Прецизионный расчет наблюдаемых величин в процессе рождения димюонных пар с большой инвариантной массой на коллайдере LHC

В. А. ЗЫКУНОВ

Исследование процесса Дрелла–Яна с нейтральным током:

$$pp \rightarrow \gamma, Z \rightarrow \mu^+ \mu^- X \quad (1)$$

при больших инвариантных массах дилептонной пары M является одним из мощных инструментов с точки зрения открытия следов Новой Физики (НФ) [1, 2, 3] среди готовящихся в CERN на Большом Адронном Коллайдере (LHC) экспериментов, поскольку дилептонный континуум очень чувствителен к модификациям СМ, индуцированным НФ. Естественно, изучение эффектов НФ невозможно без точного знания предсказаний СМ, включая эффекты, обусловленные электрослабыми радиационными поправками (ЭСП).

Условно разделим ЭСП к (1) на три категории: I) электрослабые поправки, обусловленные бозонными собственными энергиями (BSE); II) прочие электромагнитные поправки (ЭМП) (индуцированные по крайней мере одним дополнительным фотоном: виртуальным или реальным) и III) прочие слабые поправки (обусловленные по крайней мере одним дополнительным массивным бозоном: Z или W). Первый и второй вклады подробно изучены (см. напр. работы по ЭМП [4] и по ЭСП [5]). Известно, что эти вклады не содержат так называемых двойных судаковских логарифмов (СЛ) [6], дающих значительный эффект в области больших инвариантных масс. Двойные СЛ находятся во вкладе III, в то время как вклад I содержит СЛ только первой степени, которые малы по сравнению с вкладом III в области $M \gg m_Z$.

В этой работе произведен расчет I и III частей, а более конкретно – исследование вкладов BSE, вершинных функций с обменом тяжелыми бозонами (HV) и двухбозонного обмена (ZZ– и WW–боксов) в реакцию (1). В расчетах подобного рода часто возникает проблема точности, которую здесь объясним подробнее. В работе [7] тщательно разобран метод вычисления 1–, 2–, 3–, 4–точечных функций (в том числе с комплексными массами), но, вообще говоря, не в произвольной кинематической области, а с некоторым ограничением на значения внешних импульсов ([7], с. 376). Зачастую прямое применение подобных формул для численной оценки недопустимо, поскольку фактически приводит к неопределенностям типа $\infty - \infty, 0 \cdot \infty$. Другая проблема, связанная с возможной потерей точности, – это большое количество неприводящихся слагаемых (до 108, как отмечено в [7]). Далее, расчет по точным формулам с сохранением достаточной точности на числах требует значительного времени, в то время как обработка программным обеспечением огромных потоков данных предстоящих экспериментов на LHC будет требовать как можно более быстрого анализа. С этой точки зрения получение компактных и достаточно точных формул представляется весьма актуальным.

Итак, мы ставим задачу: применяя асимптотический подход, в основе которого лежит использование СЛ, получить компактные формулы для ЭСП к процессу (1), использование которых предпочтительно для ускорения обработки экспериментальной информации и не представляет опасности с точки зрения потери точности, и сравнить результаты с расчетами других групп, имеющимися в настоящий момент. Все детали вычисления (математический аппарат, обозначения, тестирование и т.д.) изложены в работе [8], а здесь мы приведем новые численные результаты для различных вкладов в кварковые сечения и сравним их с результатами группы SANC [9] (Табл. 1).

Таблица 1.

M, ТэВ	BSE	BSE, [9]	HV	HV, [9]	ZZ	ZZ, [9]	WW	WW, [9]	all	all, [9]
0.1	8.112	6.078	2.297	-1.555	0.068	-0.019	-1.27	-0.33	9.21	4.18
0.2	12.214	11.226	2.448	-1.688	-0.007	-0.091	-4.87	-3.11	9.78	6.34
0.5	11.946	11.153	4.094	4.296	-0.190	-0.214	-10.11	-10.78	5.74	4.46
1.0	12.979	12.210	5.991	6.245	-0.325	-0.335	-16.57	-17.00	2.07	1.12
2.0	13.963	13.199	8.425	8.553	-0.461	-0.464	-25.25	-25.44	-3.32	-4.15
3.0	14.531	13.768	10.094	10.171	-0.541	-0.542	-31.36	-31.47	-7.27	-8.07
5.0	15.244	14.481	12.451	12.489	-0.642	-0.643	-40.13	-40.19	-13.08	-13.86
10.0	16.208	15.446	16.102	16.116	-0.778	-0.779	-53.97	-53.99	-22.44	-23.21

В Табл. 1 приведены относительные поправки (в процентах) к кварковому борновскому сечению процесса $u\bar{u} \rightarrow \mu^+ \mu^-$, соответствующие BSE-, HV-, ZZ- и WW-вкладам в ЭСП. В первом столбце указана инвариантная масса димюона, далее в четных столбцах приведен расчет в асимптотическом подходе [8], а в нечетных – расчет по точным формулам группы SANC [9]. Обозначение "all" соответствует сумме всех вкладов. По таблице хорошо видно, что асимптотический подход обеспечивает достаточную точность (разница на уровне 1%) начиная со значения $M=0.5$ ТэВ, причем эта разница, как и следует из сути подхода, уменьшается с ростом M .

Далее приведем оценку ЭСП к адронным наблюдаемым сечениям, которые будут предметом исследования в ближайшем будущем на LHC (Табл. 2). Мы используем набор электрослабых параметров из [10], партонные распределения CTEQ6 [11] и стандартные экспериментальные ограничения установки CMS для быстроты и поперечной компоненты импульса наблюдаемых мюонов

$$|y(\mu)| \leq 2.4, \quad p_T(\mu) \geq 20 \text{ ГэВ}. \quad (2)$$

Таблица 2.

M, ТэВ	BSE	BSE, (2)	HV	HV, (2)	ZZ	ZZ, (2)	WW	WW, (2)	all	all, (2)
0.5	11.313	11.304	4.813	4.801	0.016	0.102	-0.496	-0.009	15.645	16.198
1.0	12.311	12.381	7.152	6.958	-0.005	0.120	-0.998	-0.277	18.459	19.182
2.0	13.305	13.376	10.088	9.816	-0.054	0.060	-1.733	-0.977	21.606	22.276
3.0	13.940	13.989	11.895	11.679	-0.128	-0.045	-2.345	-1.744	23.361	23.879
5.0	14.888	14.907	13.781	13.683	-0.346	-0.295	-3.913	-3.533	24.411	24.762
10.0	16.080	16.082	16.711	16.700	-0.625	-0.611	-6.012	-5.903	26.154	26.267

В Таблице 2 приведены относительные поправки (в процентах) к адронному борновскому сечению (имеется в виду дифференциальное сечение по инвариантной массе $d\sigma/dM$), соответствующие BSE-, HV-, ZZ- и WW-вкладам в ЭСП. В четных столбцах приведен расчет без учета экспериментальных ограничений, а в нечетных – с учетом (2). Видно, что BSE и HV дают значительные положительные вклады, которые растут с увеличением инвариантной массы и не очень сильно зависят от наложения экспериментальных ограничений, вклад ZZ-боксов мал, что объясняется его пропорциональностью не второй, а лишь первой степени СЛ [8]. Наконец, вклад WW-боксов значителен (так как пропорционален двойным СЛ) и более сильно зависит от наложения ограничений детектора (что есть следствие его асимметрии, которая резко выявляется при симметричном сужении кинематической области). Суммарный эффект весьма значителен ($\sim +19\%$ при $M=1$ ТэВ), это указывает на крайнюю важность процедуры радиационной поправки данных в будущих экспериментах на LHC.

Автор выражает свою искреннюю благодарность А.Б.Арбузову, Д.Ю.Бардину, С.Г.Бондаренко, И.А.Голутвину, Э.А.Кураеву, В.А.Мосолову, С.В.Шматову и Н.М.Шумейко

за внимание к работе и ценные советы при обсуждении задачи. Автор признателен группе SANC за предоставленную возможность сравнить результаты.

Abstract. The electroweak radiative corrections to the Drell-Yan process with large invariant mass (M above 1 TeV) have been studied. The results are the compact asymptotic expressions, they expand in the powers of electroweak Sudakov logarithms. At the parton level we compare the investigated radiative corrections with the existing results of group SANC and obtain a rather good coincidence at energy higher than 0.5 TeV. The numerical analysis is performed using the standard CMS cuts for simulation of the detector acceptance. The large scale of corrections does not permit to neglect the radiative correction procedure in the future experiments at the LHC.

Литература

1. N.Arkani-Hamed et al., Phys. Lett. B 429, 263 (1998) [hep-ph/9803315]; I.Antoniadis et al., Phys. Lett B 436, 257 (1998) [hep-ph/9804398]; L.Randall and R.Sundrum, Phys. Rev. Lett. 83, 3370 (1999) [hep-ph/9905221], Phys. Rev. Lett. 83, 4690 (1999) [hep-th/9906064]; C.Kokorelis, Nucl. Phys. B 677 (2004) 115 [hep-th/0207234].
2. A.Leike, Phys. Rep. 317, 143 (1999), [hep-ph/9805494]; J.L.Hewett and T.G.Rizzo, Phys. Rep. 183, 193 (1989).
3. F.Abe et al., Phys. Rev. Lett. 79, 2198 (1997); B.Abbot et al., Phys. Rev. Lett. 82, 4769 (1999).
4. V.Mosolov and N.Shumeiko, Nucl. Phys. B 186, 394 (1981); A.Soroko and N.Shumeiko, Yad. Fiz. 52, 514 (1990).
5. U.Baur et al., Phys. Rev. D 65, 033007 (2002).
6. V.Sudakov, Sov. Phys. JETP 3, 65 (1956).
7. G.'t Hooft and M.Veltman, Nucl. Phys. B 153, 365 (1979).
8. В.А.Зыкунов, ЯФ, 69, 1557, (2006).
9. A.Andonov et al., Comput. Phys. Commun. 174, 481 (2006) [arXiv:hep-ph/0411186]; SANC project website: <http://sanc.jinr.ru>, <http://pcphsanc.cern.ch>.
10. A.Arbusov et al., Eur.Phys.J. C 46, 407 (2006), [hep-ph/0506110].
11. J. Pumplin et al., JHEP {bf 0207}, 012 (2002), [hep-ph/0201195].

Объединенный институт ядерных исследований, ул. Жолио Кюри, 6,
Дубна, Московская обл., 141980, Россия
e-mail: zykunov@sunse.jinr.ru

Поступило ???.?.06