

Università degli Studi di Bari Aldo Moro
FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN FISICA

titolo

Relatore:
Dott.ssa Anna Colaleo

Laureando:
Filippo Errico

ANNO ACCADEMICO 2013-2014

Contents

Introduction	5
1 The Standard Model and beyond	7
1.1 The Standard Model	7
1.1.1 Fundamental Particles	7
1.1.2 Gauge Symmetries	8
2 Il Modello Standard e la Fisica del Bosone di Higgs	11
3 Il Modello Standard e la Fisica del Bosone di Higgs	13
4 Il Modello Standard e la Fisica del Bosone di Higgs	15
Conclusion	17
Bibliografia	18

Introduction

Il Modello Standard (MS) delle interazioni fondamentali è una delle teorie più dibattute degli ultimi anni ed ha ottenuto nell'ultimo secolo numerose conferme sperimentali, con altissimi livelli di precisione. L'ultimo pezzo mancante per la conferma della teoria è stato per un lungo periodo il bosone di Higgs, il quanto del campo scalare ritenuto responsabile della rottura spontanea della simmetria di *gauge* del MS. Grazie a questo meccanismo tutte le particelle elementari acquistano massa.

La massa del bosone di Higgs è un parametro libero della teoria e può variare in un ampio intervallo di valori. Numerosi esperimenti hanno cercato segni della sua esistenza, ma sono riusciti solo ad escludere alcuni intervalli di massa. Il *Large Hadron Collider* (LHC) è l'acceleratore di particelle costruito per investigare la rottura spontanea della simmetria e riuscire a dare una prova definitiva dell'esistenza del bosone di Higgs.

Chapter 1

The Standard Model and beyond

Particle Physics studies the building blocks of the matter, the so called fundamental particle, and how they are governed by the four fundamental forces¹.

The best theory, explaining our understanding of these particles and forces, is the *Standard Model* (SM): developed during the 1970s, it has successfully explained almost all experimental results and precisely predicted a wide variety of physical phenomena.

This chapter will describe in details the Standard Model and some theories developed in order to solve some unanswered questions.

1.1 The Standard Model

1.1.1 Fundamental Particles

All matter around us is made of elementary particles, the building blocks of matter. These particles are divided into two groups: *leptons*, with an entire value of electric charge, and *quarks*, with a fractional charge. Each group consists of six particles, which are related in pairs, or generations. The six quarks are paired in the three generations: the up quark and the down quark form the first generation, followed by the charm quark and strange quark, then the top quark and bottom (or beauty) quark. The six leptons are similarly arranged in three generations: the electron and the electron neutrino, the muon and the muon neutrino, and the tau and the tau neutrino. While electron, muon and tau are charged particles, the neutrinos are electrically neutral. In table 1.1 and 1.2, the features of leptons and quarks.

Beside these leptons and quarks, there are other particles responsible of carrying the fundamental forces, the so called *bosons*. The Electromagnetic Force, responsible of all electrical and magnetic phenomena, is mediated by the photons γ ; the Weak Force, responsible of some decays, is mediated by W^\pm and Z bosons; the Strong Force, responsible for example of the atomic structure, is mediated by the gluons (g). Last fundamental

¹In the thesis, Natural Units will be used: $c = \hbar = 1$, where $\hbar = h/2\pi = 6.58211889(26) \cdot 10^{-23} MeVs$ and $c = 299792458 ms^{-1}$.

Leptons		
Flavor	Charge	Mass[MeV]
neutrino e. (ν_e)	0	< 0.002
electron (e)	-1	0.511
neutrino mu (ν_μ)	0	< 0.19
muon (μ)	-1	105.66
neutrino tau (ν_τ)	0	< 18.2
tau (τ)	-1	1776.86 ± 0.12

Table 1.1: Standard Model leptons features [1].

Quark		
Flavor	Carica	Massa[GeV]
up (u)	+2/3	$0.0022^{+0.0006}_{-0.0004}$
down (d)	-1/3	$0.0047^{+0.0005}_{-0.0004}$
charm (c)	+2/3	1.28 ± 3
strange (s)	-1/3	0.096 ± 0.084
top (t)	+2/3	173.1 ± 0.6
bottom (b)	-1/3	$4.18^{+0.04}_{-0.03}$

Table 1.2: Standard Model quarks features [1].

force, not yet included in the SM, is the Gravity that is the weakest. In table 1.3 the features of the bosons.

Bosons	Interaction	Charge	Mass[GeV]
photon (γ)	Electromagnetic	0	0
W^\pm	Weak	± 1	80.385 ± 0.015
Z^0	Weak	0	91.1876 ± 0.0021
gluoni	Strong	0	0

Table 1.3: Standard Model bosons features [1].

1.1.2 Gauge Symmetries

The present belief is that all particles interactions may be dictated by the so called *local gauge symmetries* and this is connected with the idea that the conserved physical quantities (such as electric charge) are conserved in local regions of space and not just globally[2].

The fundamental quantity in classical mechanics is the action S , the time integral of the Lagrangian L :

$$S = \int L dt = \int \mathcal{L}(\phi, \partial\phi/\partial x_\mu) d^4x \quad (1.1)$$

where \mathcal{L} is the Lagrangian Density², and ϕ is the field, itself a function of the continuous parameters x_μ [3][4]. The *principle of least action* states that fixed the values of the coordinates at the initial time t_{in} and at the final time t_f , then classical trajectory which satisfies these conditions is an extremum of the action. This leads to the *Euler-Lagrange* equations (1.2) from which can be obtained the particle equations of motion.

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \phi} - \frac{\partial}{\partial x_\mu} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial (\partial\phi/\partial x_\mu)} = 0 \quad (1.2)$$

QED

The interaction of electron with photon is described by the Quantum Electrodynamics. Its Lagrangian is

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi \quad (1.3)$$

where complex field ψ stands for the electron. Its equation of motion can be deduced by the Dirac Equation, obtained substituting 1.3 in 1.2.

It can be shown that 1.3 is invariant under the phase transformation:

$$\psi(x) \rightarrow e^{i\alpha}\psi(x) \quad (1.4)$$

with α a real constant; according to Noether's theorem, it implies the existence of a conserved current. In this case, known as *global "gauge" invariance*, once the value of α is fixed, it is specified for all space and time.

More interesting is the case in which the parameter α depends on space and time in a completely arbitrary way where the Lagrangian (1.3) is now not invariant.

$$\psi(x) \rightarrow e^{i\alpha(x)}\psi(x) \quad (1.5)$$

This is known as *local gauge invariance*. In order to restore the Lagrangian invariance, a new modified derivative D_μ , that transforms covariantly under phase transformations, must be introduced:

$$D_\mu\psi(x) \rightarrow e^{i\alpha(x)}D_\mu\psi(x) \quad (1.6)$$

To form the "covariant derivative" D_μ a vector field A_μ must also be introduced, with the same transformation properties:

$$A_\mu\psi(x) \rightarrow A_\mu + \frac{1}{e} \partial_\mu\alpha(x) \quad (1.7)$$

This means that:

$$D_\mu \equiv \partial_\mu - ieA_\mu \quad (1.8)$$

²however, following standard use in field theory, we will often refer to \mathcal{L} simply Lagrangian.

Chapter 2

Il Modello Standard e la Fisica del Bosone di Higgs

La fisica delle particelle elementari è una branca della fisica che si occupa dello studio dei costituenti elementari della materia e delle loro interazioni fondamentali. I vari risultati ottenuti negli ultimi 50 anni di esperimenti portano al successo un unico modello teorico: il Modello Standard (MS) dell'interazioni elettrodeboli e forti delle particelle fondamentali.

Chapter 3

Il Modello Standard e la Fisica del Bosone di Higgs

La fisica delle particelle elementari è una branca della fisica che si occupa dello studio dei costituenti elementari della materia e delle loro interazioni fondamentali. I vari risultati ottenuti negli ultimi 50 anni di esperimenti portano al successo un unico modello teorico: il Modello Standard (MS) dell'interazioni elettrodeboli e forti delle particelle fondamentali.

Chapter 4

Il Modello Standard e la Fisica del Bosone di Higgs

La fisica delle particelle elementari è una branca della fisica che si occupa dello studio dei costituenti elementari della materia e delle loro interazioni fondamentali. I vari risultati ottenuti negli ultimi 50 anni di esperimenti portano al successo un unico modello teorico: il Modello Standard (MS) dell'interazioni elettrodeboli e forti delle particelle fondamentali.

Conclusion

In questo lavoro di tesi ho analizzato il processo di produzione associata, nell'ambito dell'esperimento CMS a LHC, per $m_H = 125$ GeV. Lo stato finale analizzato è il seguente:

$$(W \rightarrow \mu + \nu_\mu)(H \rightarrow \tau^+ \tau^- \rightarrow \tau_{jet} + \tau_{jet} + 2\nu_\tau),$$

Bibliography

- [1] C. Patrignani et al. (Particle Data Group), Chin. Phys. C, 40, 100001 (2016) and 2017 update.
- [2] Halzen and Martin, *Quarks and Leptons: An Introductory Course in Modern Particle Physics*, John Wiley & Sons (1984).
- [3] M.E.Peskin and D.V.Schroeder, *An Introduction To Quantum Field Theory*, Addison-Wesley, 1995.
- [4] M.Maggiore, *A Modern Introduction to Quantum Field Theory*, Oxford University Press, 2004

