

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

Scuola di Scienze  
Dipartimento di Fisica e Astronomia  
Corso di Laurea in Fisica

Estrazione del segnale  
di barioni charmati  $\Lambda_c^+$   
con tecniche di Machine Learning

Relatore:  
Prof. Andrea Alici

Presentata da:  
Giovanni Pedrelli

Anno Accademico 2023/2024



*Alla mia famiglia,  
ai miei amici  
e a Chi me li ha donati.*



# Sommario



# Indice

<b>1</b>	<b>Adronizzazione dei quark pesanti</b>	<b>1</b>
1.1	Il Modello Standard (SM)	1
1.2	Adroni e Modello a Quark (QPM)	4
1.3	La Cromodinamica Quantistica (QCD)	4
1.3.1	Cromodinamica Quantistica Perturbativa (pQCD)	5
1.4	Plasma di Quark e Gluoni (QGP)	6
1.5	Collisioni tra particelle	7
1.5.1	Collisioni tra ioni pesanti	8
1.6	Evoluzione del QGP	9
1.7	Adronizzazione di sapori pesanti in collisioni p-p	9
1.8	Adronizzazione di sapori pesanti in collisioni A-A	9
1.9	Risultati sperimentali	9
1.9.1	Adroni charmati in collisioni Pb-Pb a $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV	9
1.9.2	Adroni charmati in collisioni p-p a $\sqrt{s} = 5.02$ TeV e a $\sqrt{s} = 13$ TeV	9
<b>2</b>	<b>Esperimento ALICE</b>	<b>11</b>
2.1	LHC: Large Hadron Collider	11
2.2	ALICE: A Large Ion Collider Experiment	11
2.2.1	Considerazioni sulla costruzione	11
2.2.2	PID: Particle Identification	11
2.3	ITS: Inner Tracking System	11
2.4	TPC: Time Projection Chamber	11
2.5	TOF: Time Of Flight	11
<b>3</b>	<b>Terzo</b>	<b>13</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>15</b>





# Capitolo 1

## Adronizzazione dei quark pesanti

### 1.1 Il Modello Standard (SM)

La fisica delle particelle elementari ha lo scopo di indagare la struttura microscopica della materia andando alla ricerca dei costituenti ultimi della realtà e delle loro interazioni. L'insieme delle teorie che meglio hanno saputo descrivere le evidenze sperimentali ha trovato una coerente formulazione teorica nel Modello Standard (Standard Model MS) della fisica delle particelle elementari. Ad oggi il modello prevede l'esistenza di tre tipologie di particelle elementari: quark, leptoni e bosoni mediatori i quali rappresentano tre delle quattro interazioni fondamentali, come rappresentato in figura 1.1, esclusa quella gravitazionale non spiegabile con le teorie attuali.

Il Modello Standard descrive dodici campi materiali dotati di massa che rappresentano i dodici sapori delle particelle materiali classificate in base alle loro interazioni. Queste particelle di spin  $\frac{1}{2}$  sono dette *fermioni* poiché seguono la statistica di Fermi-Dirac. I fermioni si dividono in sei quark e sei leptoni: i primi sono soggetti a tutte le interazioni naturali, mentre i secondi non interagiscono con la forza forte [1].

I *quark* up e down, charm e strange, top e bottom sono organizzati in doppietti o generazioni nelle quali il primo elemento è generalmente il più massivo e ha carica elettrica positiva di modulo uguale a  $\frac{2}{3}$  quella dell'elettrone, mentre il secondo ha carica elettrica negativa modulo uguale a  $\frac{1}{3}$  di quella dell'elettrone.

I *leptoni* il cui nome deriva dal greco *leptos*, leggero, poiché solitamente di massa inferiore ai quark, sono organizzati in doppietti: elettrone, muone e tauone e relativi neutrini elettronico, muonico e tauonico; i primi tre hanno carica elettrica negativa e unitaria, mentre i neutrini hanno carica elettrica e massa nulle secondo il Modello Standard. Le più recenti evidenze sperimentali mostrano però che i neutrini acquisiscono massa attraverso meccanismi ancora ignoti.

Alle dodici particelle elementari corrispondono dodici *antiparticelle* teorizzate per la prima volta nel 1929 dal fisico britannico Paul Dirac. Queste particelle hanno caratteri-

## Standard Model of Elementary Particles

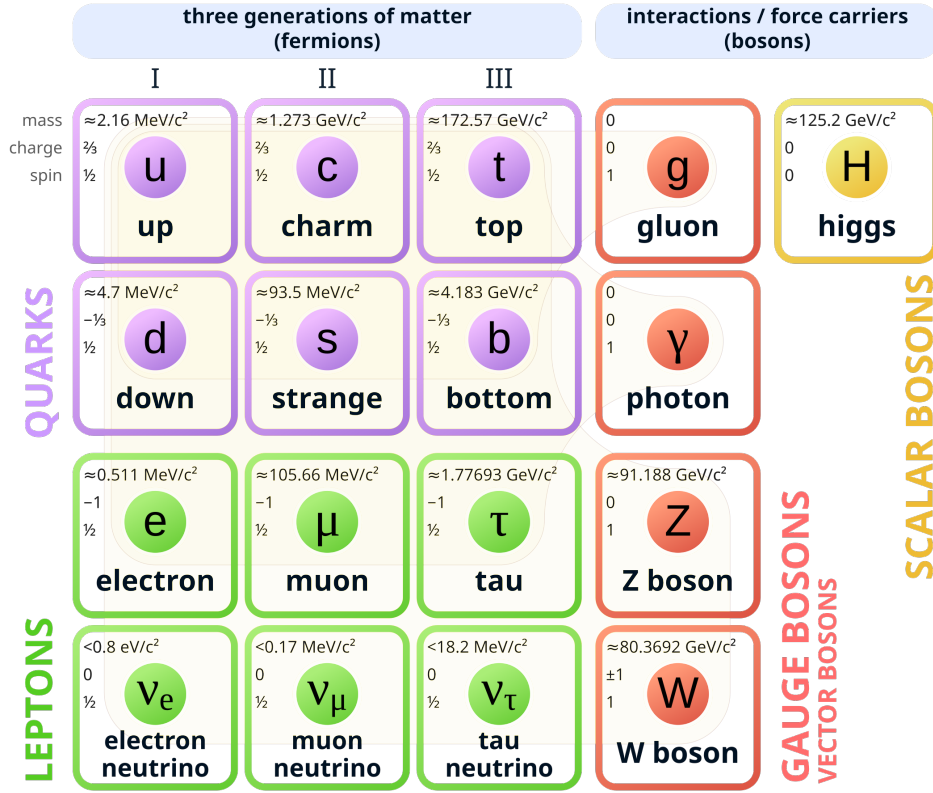


Figura 1.1: Schema delle particelle elementari presenti nel Modello Standard con relativa massa, carica e spin [2].

stiche fisiche come massa, spin e vita media uguali a quelle delle relative particelle, ma numeri quantici e cariche opposte.

In seguito troviamo le particelle mediatrici delle interazioni fondamentali. Queste particelle hanno spin 1 e sono dette *bosoni*, vettore o di gauge, poiché seguono la statistica di Bose-Einstein e corrispondono alle tre interazioni fondamentali spiegate dal Modello Standard: otto gluoni  $g$  mediatori dell'interazione forte, ciascuno con tre cariche di colore possibili, il fotone  $\gamma$  mediatore dell'interazione elettromagnetica e i bosoni  $Z^0$  e  $W^\pm$  mediatori dell'interazione debole.

Infine nel 2012 al CERN di Ginevra è stato scoperto dagli esperimenti ATLAS [3] e CMS [4] un bosone scalare di spin 0 chiamato bosone di Higgs  $H$  associato al campo di Higgs col quale interagiscono tutte le particelle massive, fermioniche o bosoniche, per ottenere la loro massa tramite un meccanismo detto di *rottura spontanea della simmetria*.

ipotizzato nel 1964 da F. Englert e R. Brout [5], Peter W. Higgs [6] e G. S. Guralnik, C. R. Hagen e T. W. B. Kibble [7].

È bene precisare che quelle presentate non sono particelle in senso classico, ma si fa sempre riferimento a campi quantizzati in cui i campi materiali possiedono cariche interne che permettono l'accoppiamento coi relativi campi di forza. Le teorie che compongono il Modello Standard sono teorie di campo quantizzato (Quantum Field Theory QFT): la *Teoria Elettrodebole* che generalizza la Elettrodinamica Quantistica (Quantum Electrodynamics QED) e spiega i fenomeni elettromagnetici e di interazione debole e la *Cromodinamica Quantistica* (Quantum Chromodynamics QCD) che spiega l'interazione tra quark attraverso lo scambio di gluoni. Ancora però non siamo capaci di descrivere in senso quantistico l'ultima interazione naturale, quella gravitazionale, per questo non presente nel modello.

La fisica delle particelle studia fenomeni che coinvolgono corpi di dimensioni infinitesime a velocità prossime a quella della luce, è naturale quindi che il formalismo matematico del Modello Standard sia quello delle teorie di campo quantizzato che rappresentano l'evoluzione della meccanica quantistica in ambito relativistico, permettono lo studio di fenomeni sia quantistici sia relativistici e la creazione e distruzione di particelle.

Il concetto di campo quantizzato è associato sia alle particelle sia alle loro interazioni: le prime sono interpretate come manifestazione del relativo campo, le ultime come scambio di quanti virtuali col campo di forza relativo all'interazione in gioco. Il Modello Standard è una teoria quantistica di campo di gauge locale che nel linguaggio della teoria dei gruppi di simmetrie si indica come  $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$  in cui, da sinistra, sono racchiuse le tre interazioni naturali: forte, debole e elettromagnetica.

Le interazioni nucleari forti sono a corto raggio per cui confinate all'interno dell'adron e descritte dalla simmetria inviolata  $SU(3)_C$ , dove  $C$  sta per colore, sulla quale poggia la *Cromodinamica Quantistica* (QCD, vedi 1.3). Lo spazio di  $SU(3)_C$  ha  $3^2 - 1 = 8$  generatori, cioè otto bosoni di gauge di spin 1 chiamati *gluoni*  $g$  mediatori dell'interazione forte. Come detto prima, tra i fermioni solo i quark sono soggetti all'interazione forte ovvero possiedono la carica, di colore, di  $SU(3)_C$  che può assumere tre valori convenzionalmente indicati come *red* ( $r$ ), *green* ( $g$ ) e *blue* ( $b$ ) e rispettivi anticolori. I quark interagiscono tra loro scambiando gluoni dotati di una doppia carica di colore: colore-anticolore, a differenza dei fotoni che sono elettricamente neutri e cioè non possiedono la carica del campo che mediano. Per questo motivo i gluoni possono interagire tra loro, mentre i fotoni no. Matematicamente questa differenza è descritta dalla non abelianità del gruppo della QCD e dalla abelianità di quello della QED.

Le interazioni debole e elettromagnetica sono descritte e unificate dalla simmetria  $SU(2)_L \times U(1)_Y$ , dove  $L$  sta per leptoni e  $Y$  per hypercharge, supercarica, e dal meccanismo di Higgs di rottura della simmetria che permette alle particelle di acquisire la loro massa. Nella forma più semplice questo meccanismo produce 4 bosoni di gauge, vettori, di spin 1: due neutri di cui uno massivo ( $Z^0$ ) e uno privo di massa ( $\gamma$ ) e due carichi e massivi ( $W^\pm$ ) più un bosone scalare di spin 0, il bosone di Higgs ( $H$ ) [8].

## 1.2 Adroni e Modello a Quark (QPM)

I dati relativi agli esperimenti di diffusione profondamente inelastica e-p suggerirono un modello fenomenologico dell'interno dell'adrone che prese il nome di *modello a partoni*. Proposto da Richard Feynman nel 1969, questo modello ipotizza che i nucleoni, costituenti del nucleo atomico, non siano particelle elementari, ma siano costituiti da centri diffusori puntiformi detti partoni. In seguito i partoni vennero identificati con quark e gluoni e oggi il termine *partone* indica quark e gluoni costituenti di un adrone indifferentemente.

Col termine *adrone* indichiamo le particelle composte di quark, solitamente più pesanti dei leptoni, il cui nome deriva dal greco *hadrón*, pesante, che possiedono carica di colore e che possono quindi interagire tramite forza forte. Solitamente i quark che costituiscono l'adrone vengono chiamati *quark di valenza*, mentre gluoni, quark e antiquark virtuali generati dalle forze forti che uniscono i quark di valenza vengono chiamati *mare*.

Il Modello a Quark noto anche come Modello a Partoni o Modello Quark-Partone (Quark-Parton Model QPM), è un modello che descrive gli adroni come composti di quark fornendone una semplice classificazione. Poiché i quark liberi, ovvero non legati assieme all'interno di un adrone, non sono mai stati osservati, è stato postulato che i quark siano confinati all'interno degli adroni come verrà chiarito meglio in 1.3.

## 1.3 La Cromodinamica Quantistica (QCD)

Chiarita la struttura interna degli adroni, la QCD ci fornirà ora un quadro teorico più completo per descrivere le interazioni tra quark e gluoni.

Come già accennato in 1.1, la *Cromodinamica Quantistica* (QCD) è la teoria di campo quantizzato che descrive l'interazione forte attraverso scambi di gluoni. È una teoria di gauge non abeliana con gruppo di simmetria  $SU(3)_C$ , possiede quindi 8 generatori o bosoni di gauge vettori di spin 1 mediatori dell'interazione forte, chiamati *gluoni*  $g$  che possiedono a loro volta una doppia carica di colore: colore-anticolore. La QCD mostra come le uniche combinazioni di quark possibili per formare un adrone siano *mesoni* (coppie quark-antiquark) e *barioni* (tripletti di quark e antiquark). Nonostante questo sono stati sperimentalmente osservati stati esotici di quattro e cinque quark e stati legati di soli gluoni.

Sperimentalmente non sono mai stati osservati quark liberi a causa del cosiddetto *confinamento di colore*: i quark si legano in doppietti o tripletti che devono necessariamente essere di colore bianco ovvero neutri cioè con carica di colore nulla. Il confinamento di colore prevede infatti che sia energeticamente favorevole la produzione di una ulteriore coppia quark-antiquark, chiamata *jet adronico*, nel caso si tentasse la separazione tra quark e antiquark in un mesone fornendo energia, rendendo impossibile l'ottenimento di un quark libero come mostrato in figura 1.2.

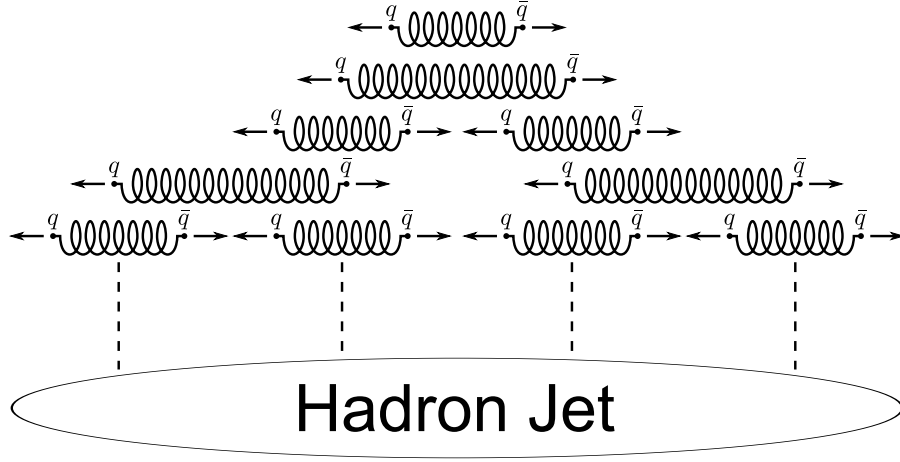


Figura 1.2: Rappresentazione grafica della rottura di stringa QCD nel vuoto. La figura mostra come venga generata una coppia quark-antiquark quando un mesone riceve energia sufficiente: il gluone che lega i due quark si "allunga" finché non si spezza e forma una nuova coppia quark-antiquark [9].

Un'altra importante proprietà della QCD è la *libertà asintotica* secondo la quale l'intensità dell'interazione forte è estremamente alta a basse scale di energia o grandi distanze. Questo contribuisce alla stabilità dello stato legato dei quark negli adroni e sfavorisce l'esistenza di quark liberi. In regime di alte energie o piccole distanze invece l'interazione è molto meno intensa permettendo l'utilizzo di approcci di calcolo *perturbativi* [10].

### 1.3.1 Cromodinamica Quantistica Perturbativa (pQCD)

Due sono gli approcci tradizionali alla QCD perturbativa. Il primo è il metodo detto dell'*Elemento di Matrice* (Matrix Element ME) [8] in cui i diagrammi di Feynman sono calcolati compiutamente per ogni ordine. In linea di principio questo metodo è il più rigoroso, ma incontra grandi difficoltà già al terzo ordine, tanto che i soli calcoli ad ora disponibili si arrestano al secondo ordine perturbativo.

Il secondo approccio è quello della Cascata di Partoni (*Parton Shower* PS) [11]. Si tratta in questo caso di produrre un numero arbitrario di partoni che combinati tra loro generano gli eventi a più jet. Questo è possibile poiché non vengono utilizzate le espressioni complete degli elementi di matrice, ma solo delle loro approssimazioni.

Per determinare il regime in cui la teoria perturbativa è applicabile è necessario valutare il valore di  $Q^2 = -q^2$  con  $q$  *quadrimento* trasferito nella collisione e segno negativo derivante dalla metrica di Minkowski [12]. Nel nostro caso, per grandi valori di  $Q^2$ , l'interazione forte diventa meno intensa e può quindi essere trattata con metodi perturbativi rendendo così la *QCD perturbativa* (perturbative QCD, pQCD) un approccio valido.

## 1.4 Plasma di Quark e Gluoni (QGP)

Un modello euristico che permette di descrivere i quark confinati negli adroni è il *MIT bang model* [13]. Secondo questo modello i quark sono particelle di massa nulla all'interno di una scatola di dimensioni finite e infinitamente massivi all'esterno. In questo modo il confinamento non è altro che il risultato del bilancio tra pressione esterna e interna, quest'ultima data dall'energia cinetica dei quark stessi. I gluoni scambiati tra quark sono anch'essi confinati nella scatola la cui carica di colore totale deve essere nulla.

Questo modello fornisce ragioni sufficienti del perché ci aspettiamo di trovare nuove fasi della materia formata da quark oltre alla materia adronica: se la pressione esercitata dai quark interni crescesse oltre il valore della pressione esterna si verrebbe a creare un nuovo stato della materia a temperature e pressioni altissime in cui quark e gluoni non sono più legati, chiamato *Plasma di Quark e Gluoni* (Quark Gluon Plasma QGP). Una rappresentazione indicativa del diagramma di fase della materia fortemente interagente è riportato in figura 1.3.

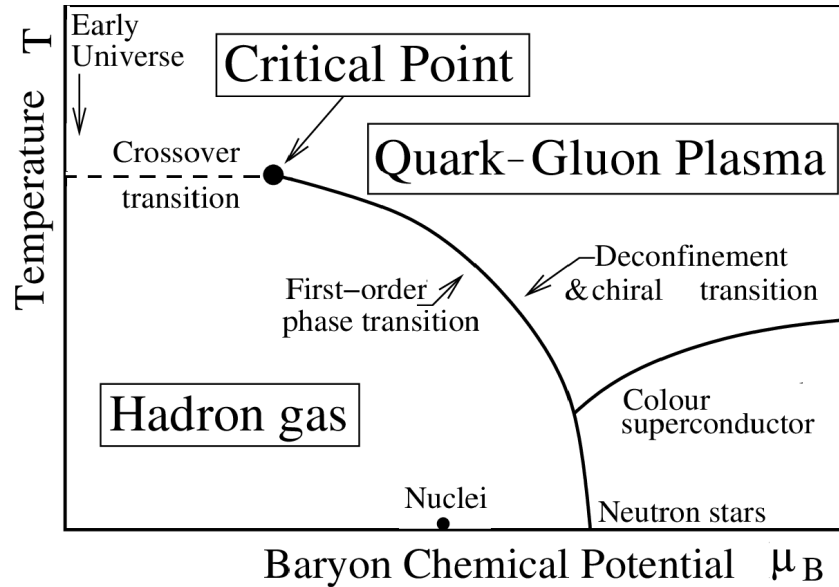


Figura 1.3: Diagramma di fase qualitativo della materia fortemente interagente [14].

Quando il sistema raggiunge la temperatura critica  $T_C \approx 150\text{--}200\text{ MeV}$  avviene una transizione di fase del primo ordine tra materia adronica e QGP. La densità di energia nell'intorno di questa transizione presenta una discontinuità detta *calore latente di deconfinamento*. La regione di basse temperature e alte densità è detta regione di *di-quark matter* o regione di *superconduttività di calore*. In queste condizioni avviene la formazione di coppie di quark non neutre di colore analoghe alle coppie di Cooper dei superconduttori.

La capacità dei barioni di ricombinare i quark per formare nuovi adroni è chiamata potenziale chimico barionico o *potenziale bariochimico*, influenza la composizione di barioni e mesoni prodotti nelle collisioni ed è formulato come segue:

$$\mu_B = \frac{dE}{dN_B}. \quad (1.1)$$

Un caso particolare è il QGP fortemente legato (*strongly-coupled QGP* sQGP) nel quale le interazioni tra quark e gluoni sono estremamente forti e non possono essere trattate con gli approcci convenzionali basati sulla teoria perturbativa.

## 1.5 Collisioni tra particelle

Nello studio della QCD le predizioni teoriche si basano sul calcolo perturbativo di sistemi di quark e gluoni dotati di colore, carica che rappresenta i gradi di libertà a piccola distanza, le osservazioni sperimentali invece sono fatte su stati finali di adroni, ovvero stati legati di partoni in singoletto di colore. È quindi necessario analizzare i processi che portano allo stato finale cercando di descriverli con le caratteristiche dell'interazione partonica iniziale.

Le collisioni tra ioni pesanti (A-A) accelerati ad energie relativistiche sono lo strumento migliore per studiare la materia nucleare in condizioni estreme di temperatura e densità di energia. È così possibile produrre numerose collisioni simultanee tra i vari nucleoni presenti nei due nuclei collidenti creando un sistema ad altissima densità di partoni prodotti interagenti tra loro e permettono di riprodurre in laboratorio le condizioni dell'universo primordiale frazioni di secondo dopo il Big-Bang, come il QGP.

L'avvenuta formazione di uno stato di QGP può essere verificata attraverso la misura di diversi effetti come gli spettri di impulso delle particelle prodotte, la soppressione o l'aumento di produzione di stati legati di quark pesanti e la presenza di moti collettivi. È poi necessario confrontare le misure ottenute con quelle di scontri p-p alle stesse energie per assicurarsi che lo stato prodotto in collisioni A-A non sia una semplice sovrapposizione di scontri p-p e che si tratti effettivamente di QGP e non di un gas di adroni eccezionalmente denso.

A complicare ulteriormente questo quadro, le differenze tra i risultati ottenuti in collisioni A-A e p-p potrebbero essere dovute all'utilizzo di proiettili estesi, i nuclei, nel primo caso, in particolare per le modifiche alle funzioni di distribuzione partonica nei nucleoni appartenenti ad un nucleo e alla presenza di scattering multipli prima di un hard scattering. È quindi necessario accertarsi che i risultati ottenuti in collisioni A-A non dipendano da questi effetti denominati di *effetti di stato iniziale*. Per fare ciò vengono utilizzate collisioni protone-ione p-A.

**1.5.1 Collisioni tra ioni pesanti**



## 1.6 Evoluzione del QGP

### 1.7 Adronizzazione di sapori pesanti in collisioni p-p

### 1.8 Adronizzazione di sapori pesanti in collisioni A-A

## 1.9 Risultati sperimentali

### 1.9.1 Adroni charmati in collisioni Pb-Pb a $\sqrt{s_{NN}} = 5.02 \text{ TeV}$

### 1.9.2 Adroni charmati in collisioni p-p a $\sqrt{s} = 5.02 \text{ TeV}$ e a $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$



# Capitolo 2

## Esperimento ALICE

2.1 LHC: Large Hadron Collider

2.2 ALICE: A Large Ion Collider Experiment

2.2.1 Considerazioni sulla costruzione

2.2.2 PID: Particle Identification

2.3 ITS: Inner Tracking System

2.4 TPC: Time Projection Chamber

2.5 TOF: Time Of Flight



# Capitolo 3

## Terzo

Terzo

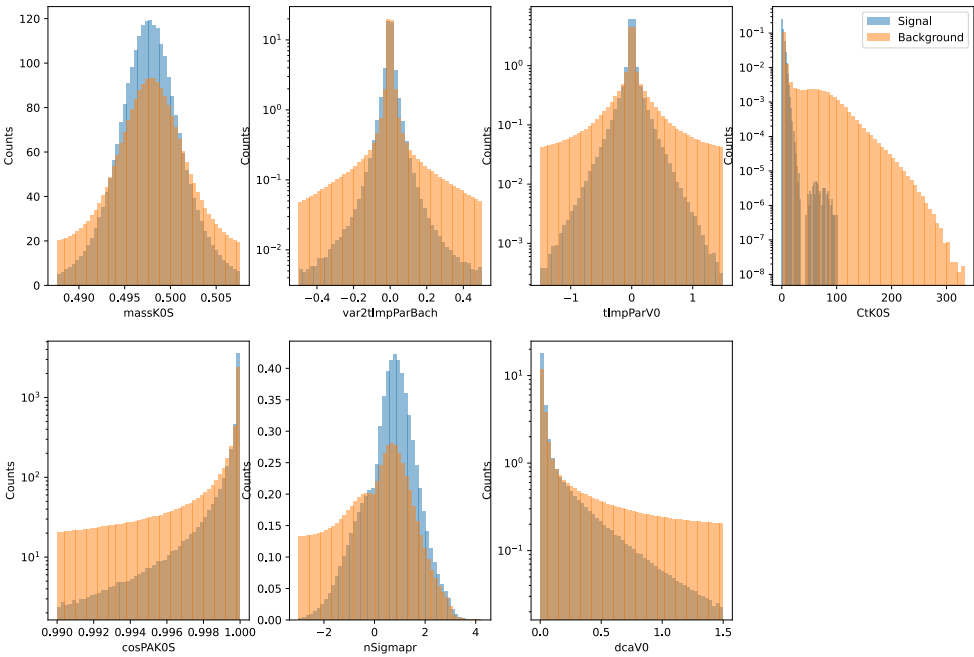


Figura 3.1: Caption



# Bibliografia

- [1] W. N. Cottingham e D. A. Greenwood. *An Introduction to the Standard Model of Particle Physics*. 2nd. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. ISBN: 978-0521852494. DOI: 10.1017/9781009401685. URL: <https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/64010> (cit. a p. 1).
- [2] Wikimedia Commons. *Standard Model of Elementary Particles*. Accessed: 2024-10-03. 2024. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard\\_Model\\_of\\_Elementary\\_Particles.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg) (cit. a p. 2).
- [3] The ATLAS Collaboration. «Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC». In: *Physics Letters B* 716.1 (set. 2012), pp. 1–29. ISSN: 0370-2693. DOI: 10.1016/j.physletb.2012.08.020. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.020> (cit. a p. 2).
- [4] The CMS Collaboration. «Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC». In: *Physics Letters B* 716.1 (set. 2012), pp. 30–61. ISSN: 0370-2693. DOI: 10.1016/j.physletb.2012.08.021. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.021> (cit. a p. 2).
- [5] F. Englert e R. Brout. «Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons». In: *Phys. Rev. Lett.* 13 (9 ago. 1964), pp. 321–323. DOI: 10.1103/PhysRevLett.13.321. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.13.321> (cit. a p. 3).
- [6] Peter W. Higgs. «Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons». In: *Physical Review Letters* 13.16 (ott. 1964), pp. 508–509. DOI: 10.1103/PhysRevLett.13.508. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.13.508> (cit. a p. 3).
- [7] G. S. Guralnik, C. R. Hagen e T. W. B. Kibble. «Global Conservation Laws and Massless Particles». In: *Phys. Rev. Lett.* 13 (20 nov. 1964), pp. 585–587. DOI: 10.1103/PhysRevLett.13.585. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.13.585> (cit. a p. 3).

- [8] Lorenzo Vitale. « $K^0$  e  $\Lambda$  in DELPHI per sondare le proprietà di frammentazione nei decadimenti adronici della  $Z$ ». 1995. URL: <http://hdl.handle.net/10077/11331> (cit. alle pp. 3, 5).
- [9] Wikimedia Commons. *Quark Confinement*. Accessed: 2024-10-01. 2024. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Quark\\_confinement.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Quark_confinement.svg) (cit. a p. 5).
- [10] S. Braibant, G. Giacomelli e M. Spurio. *Particelle e interazioni fondamentali: Il mondo delle particelle*. 2<sup>a</sup> ed. UNITEXT. Second edition, revised and expanded. Milan, Italy: Springer Milano, 2012. ISBN: 978-88-470-2753-4. DOI: 10.1007/978-88-470-2754-1. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-88-470-2754-1> (cit. a p. 5).
- [11] B. A. Bambah et al. «QCD generators for LEP». In: *Z Physics at LEP1: CERN, Geneva, Switzerland 20 - 21 Feb, 8 - 9 May and 4 - 5 Sep 1989. Workshop on Z Physics at LEP1*. CERN. Geneva: CERN, lug. 1989, pp. 143–340. DOI: 10.5170/CERN-1989-008-V-3.143. URL: <https://cds.cern.ch/record/199224> (cit. a p. 5).
- [12] Guido Altarelli. *Interazioni fondamentali, Enciclopedia del Novecento*. Accessed: 2024-10-03. 2004. URL: [https://www.treccani.it/enciclopedia/interazioni-fondamentali\\_\(Enciclopedia-del-Novecento\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/interazioni-fondamentali_(Enciclopedia-del-Novecento)/) (cit. a p. 5).
- [13] Cheuk-Yin Wong. *Introduction to High-Energy Heavy-Ion Collisions*. World Scientific, 1994. DOI: 10.1142/1128. eprint: <https://www.worldscientific.com/doi/pdf/10.1142/1128>. URL: <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/1128> (cit. a p. 6).
- [14] Wikimedia Commons. *PhasDiagQGP*. Accessed: 2024-10-04. 2024. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/File:PhasDiagQGP.png> (cit. a p. 6).