

# Kvark-hadron dualnost

Lovre Pavičić

Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu

27. siječnja 2022.

- Uvod - opis problema i ilustrativna fizikalna slika

- Uvod - opis problema i ilustrativna fizikalna slika
- Matematička formulacija na primjeru procesa  $e^+e^- \rightarrow$  hadroni

- Uvod - opis problema i ilustrativna fizikalna slika
- Matematička formulacija na primjeru procesa  $e^+e^- \rightarrow$  hadroni
- Formalna definicija kvark-hadron dualnosti

- Teorija jake interakcije - QCD (kvarkovi i gluoni)

- Teorija jake interakcije - QCD (kvarkovi i gluoni)
- Eksperiment - hadroni (vezana stanja kvarkova i gluona)

- Teorija jake interakcije - QCD (kvarkovi i gluoni)
- Eksperiment - hadroni (vezana stanja kvarkova i gluona)
- Kvar-kadron dualnost je ideja da će teorijski izračunate fizikalne vrijednosti u slici kvarkova i gluona barem aproksimativno odgovarati mjerenim eksperimentalnim vrijednostima

# Uvod - fizikalna slika

- Promotrimo procese u kojima se mogu izdvojiti dvije faze



# Uvod - fizikalna slika

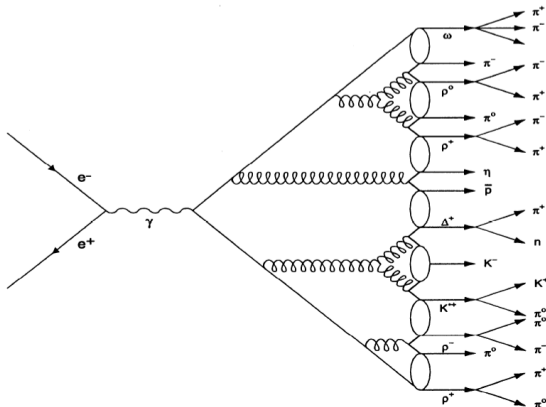
- Promotrimo procese u kojima se mogu izdvojiti dvije faze
- Prva faza je osnovna tranzicija - uključuje kvarkove i gluone, tipično se odvija na kratkim vremenskim skalama ( $\sim 1/Q$ )

# Uvod - fizikalna slika

- Promotrimo procese u kojima se mogu izdvojiti dvije faze
- Prva faza je osnovna tranzicija - uključuje kvarkove i gluone, tipično se odvija na kratkim vremenskim skalama ( $\sim 1/Q$ )
- Druga faza je hadronizacija - obično se odvija na puno većim vremenskim skalama od prve faze ( $\sim Q/\Lambda^2$ )

# Uvod - fizikalna slika

- Primjer elektron-pozitron anihilacije:



## Uvod - fizikalna slika

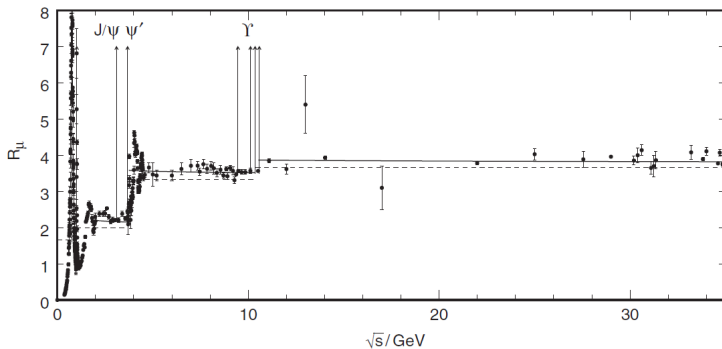
- Dokle god možemo razdvojiti te dvije faze možemo reći da je udarni presjek "određen" u prvoj fazi

## Uvod - fizikalna slika

- Dokle god možemo razdvojiti te dvije faze možemo reći da je udarni presjek "određen" u prvoj fazi
- Problem nastaje na *rezonancama* kada se one počnu miješati

# Uvod - fizikalna slika

- Dokle god možemo razdvojiti te dvije faze možemo reći da je udarni presjek "određen" u prvoj fazi
- Problem nastaje na *rezonancama* kada se one počnu miješati



# Uvod - postupak

- Vidimo da rezonance predstavljaju problem u perturbativnom računu udarnih presjeka

# Uvod - postupak

- Vidimo da rezonance predstavljaju problem u perturbativnom računu udarnih presjeka
- Računamo udarni presjek za negativne prijenose impulsa  $Q^2$  (Euklidska domena) gdje smo sigurni da nema rezonanci



# Uvod - postupak

- Vidimo da rezonance predstavljaju problem u perturbativnom računu udarnih presjeka
- Računamo udarni presjek za negativne prijenose impulsa  $Q^2$  (Euklidska domena) gdje smo sigurni da nema rezonanci
- Analitički proširujemo dobivenu funkciju na područje pozitivnih prijenosa impulsa (Minkowski domena)

# Uvod - postupak

- Vidimo da rezonance predstavljaju problem u perturbativnom računu udarnih presjeka
- Računamo udarni presjek za negativne prijenose impulsa  $Q^2$  (Euklidska domena) gdje smo sigurni da nema rezonanci
- Analitički proširujemo dobivenu funkciju na područje pozitivnih prijenosa impulsa (Minkowski domena)
- Tim postupkom dobivamo glatku funkciju i još uvijek ne možemo opisati nagle skokove na rezonantnim energijama

- Kvar-kadron dualnost se prvi put spominje 1976. u članku Poggia, Quinna i Weinberga

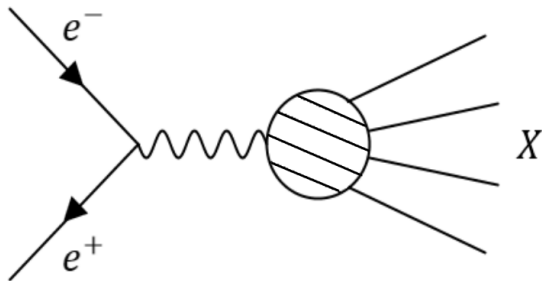
- Kvar-khadron dualnost se prvi put spominje 1976. u članku Poggia, Quinna i Weinberga
- Oni tvrde da kad se izmjereni udarni presjek usrednji on će aproksimativno odgovarati teoretskom

- Kvar-kadron dualnost se prvi put spominje 1976. u članku Poggia, Quinna i Weinberga
- Oni tvrde da kad se izmjereni udarni presjek usrednji on će aproksimativno odgovarati teoretskom
- Njihova formulacija je bila na labavim temeljima i dosta nejasna, no dovoljno dobro je opisivala tadašnje eksperimentalne podatke

- Kvar-kadron dualnost se prvi put spominje 1976. u članku Poggia, Quinna i Weinberga
- Oni tvrde da kad se izmjereni udarni presjek usrednji on će aproksimativno odgovarati teoretskom
- Njihova formulacija je bila na labavim temeljima i dosta nejasna, no dovoljno dobro je opisivala tadašnje eksperimentalne podatke
- U nastavku će biti predstavljena formulacija na bazi *Wilsonovog razvoja produkta operatora* (OPE)

# OPE na primjeru $e^-e^+ \rightarrow \text{hadroni}$

Proces koji promatramo:



# OPE - optički teorem

- Optički teorem nam tvrdi:

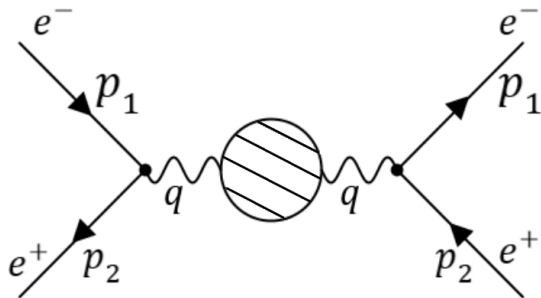
$$\sigma_{tot}(e^- e^+ \rightarrow \text{hadroni}) = \frac{1}{s} \text{Im}(\mathcal{M}(e^- e^+ \rightarrow e^- e^+)) \quad (1)$$



# OPE - optički teorem

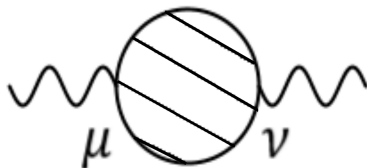
- Optički teorem nam tvrdi:

$$\sigma_{tot}(e^- e^+ \rightarrow \text{hadroni}) = \frac{1}{s} \text{Im}(\mathcal{M}(e^- e^+ \rightarrow e^- e^+)) \quad (1)$$



# OPE - vakuumska polarizacija

- Središnji dio dijagrama (vakuumska polarizacija):



čiji doprinos amplitudi označavamo s  $\Pi_h^{\mu\nu} = (q^2 g^{\mu\nu} - q^\mu q^\nu) \Pi_h(q^2)$

- $\Pi_h^{\mu\nu}$  se može zapisati kao

$$i\Pi_h^{\mu\nu}(q) = -e^2 \int d^4x e^{iq \cdot x} \langle \Omega | T \{ J^\mu(x) J^\nu(0) \} | \Omega \rangle \quad (2)$$

gdje je  $J^\mu = \sum_f Q_f \bar{q}_f \gamma^\mu q_f$

- $\Pi_h^{\mu\nu}$  se može zapisati kao

$$i\Pi_h^{\mu\nu}(q) = -e^2 \int d^4x e^{iq \cdot x} \langle \Omega | T \{ J^\mu(x) J^\nu(0) \} | \Omega \rangle \quad (2)$$

gdje je  $J^\mu = \sum_f Q_f \bar{q}_f \gamma^\mu q_f$

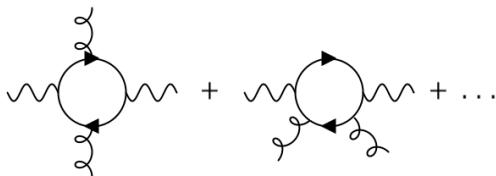
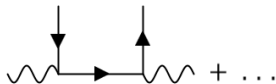
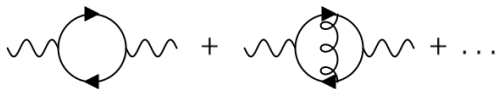
- *Wilsonov OPE:*

$$J^\mu(x) J^\nu(0) \rightarrow C_1^{\mu\nu}(x) \mathbf{1} + C_{\bar{q}q}^{\mu\nu}(x) \cdot m \bar{q}q(0) + \\ + C_{G^2}^{\mu\nu}(x) \cdot G_{\alpha\beta}^a G^{a\alpha\beta}(0) + \dots \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 i\Pi_h^{\mu\nu}(q) = & -ie^2(q^2 g^{\mu\nu} - q^\mu q^\nu) \times \\
 & \times (c_1(q^2) + c_{\bar{q}q} \cdot \langle \Omega | m \bar{q} q(0) | \Omega \rangle + \\
 & + c_{G^2} \langle \Omega | G_{\alpha\beta}^a G^{a\alpha\beta}(0) | \Omega \rangle + \dots)
 \end{aligned} \tag{4}$$

# Koeficijenti OPE

- Koeficijenti u OPE se računaju putem Feynmanovih dijagrama;



# Kvark hadron dualnost

- Red u koeficijentima za OPE i red kondenzata moramo odrezati negdje

# Kvark hadron dualnost

- Red u koeficijentima za OPE i red kondenzata moramo odrezati negdje
- Naš račun ne može biti egzaktan



# Kvark hadron dualnost

- Red u koeficijentima za OPE i red kondenzata moramo odrezati negdje
- Naš račun ne može biti egzaktnan
- Ako izračunati udarni presjek odgovara izmjerenom do na očekivanu nesigurnost kažemo da su oni **dualni**

# Kvark hadron dualnost

- Red u koeficijentima za OPE i red kondenzata moramo odrezati negdje
- Naš račun ne može biti egzaktnan
- Ako izračunati udarni presjek odgovara izmjerenom do na očekivanu nesigurnost kažemo da su oni **dualni**
- Ako postoje odstupanja veća od očekivane nesigurnosti kažemo da dolazi do narušenja dualnosti

# Narušenja dualnosti

- Pomoću Wilsonovog OPE smo opisali proces oko singulariteta u  $x^2 \rightarrow 0$  no postoje i drugi singulariteti kao npr.  $1/(x^2 - \rho^2)$

# Narušenja dualnosti

- Pomoću Wilsonovog OPE smo opisali proces oko singulariteta u  $x^2 \rightarrow 0$  no postoje i drugi singulariteti kao npr.  $1/(x^2 - \rho^2)$
- Oni generiraju članove tipa  $\sim \exp(-Q\rho)$

# Narušenja dualnosti

- Pomoću Wilsonovog OPE smo opisali proces oko singulariteta u  $x^2 \rightarrow 0$  no postoje i drugi singulariteti kao npr.  $1/(x^2 - \rho^2)$
- Oni generiraju članove tipa  $\sim \exp(-Q\rho)$
- Takvi članovi su potisnuti u Euklidskoj domeni no prelaskom u Minkowski domenu ( $Q \rightarrow iE$ ) oni postaju oscilatorni i kao takvi su jedan od uzroka narušenja dualnosti

# Narušenja dualnosti

- Pomoću Wilsonovog OPE smo opisali proces oko singulariteta u  $x^2 \rightarrow 0$  no postoje i drugi singulariteti kao npr.  $1/(x^2 - \rho^2)$
- Oni generiraju članove tipa  $\sim \exp(-Q\rho)$
- Takvi članovi su potisnuti u Euklidskoj domeni no prelaskom u Minkowski domenu ( $Q \rightarrow iE$ ) oni postaju oscilatorni i kao takvi su jedan od uzroka narušenja dualnosti
- Narušenja dualnosti se ne mogu opisati iz nekakvih prvih principa, već se trebaju tretirati raznim modelima

## Literatura:

- 1 E.C. Poggio, H.R. Quinn and S. Weinberg, Phys. Rev. D 13, 1958 (1976).
- 2 M. Shifman, *Lectures on quark-hadron duality*, Czech.J.Phys. 52 B102-B135 (2002)
- 3 I. Bigi, N. Uraltsev, *A vademecum on quark-hadron duality*, Int.J.Mod.Phys.A 16 5201-5248 (2001)
- 4 M. Peskin, D. Schroeder, *An Introduction to quantum field theory* (Westview Press, 1995.)
- 5 M. E. Zomorrodian, *Hadronization and QCD in  $e^+e^-$  annihilation at  $\sqrt{s} = 52 - 57$  GeV*, I.R.E.PHY., Vol. 5, N. 3 98-104 (2011)