

Kvarki, močna sila ter običajni in neobičajni hadroni

Saša Prelovšek Komelj

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za Matematiko in Fiziko

Institut Jozef Stefan, Odsek za teoretično fiziko

Univerza v Regensburgu



DMFA, Bled, 27.9.2019

Naslovni junaki

Kvarki

- osnovni delci snovi

Hadroni

- stanja sestavljena iz kvarkov

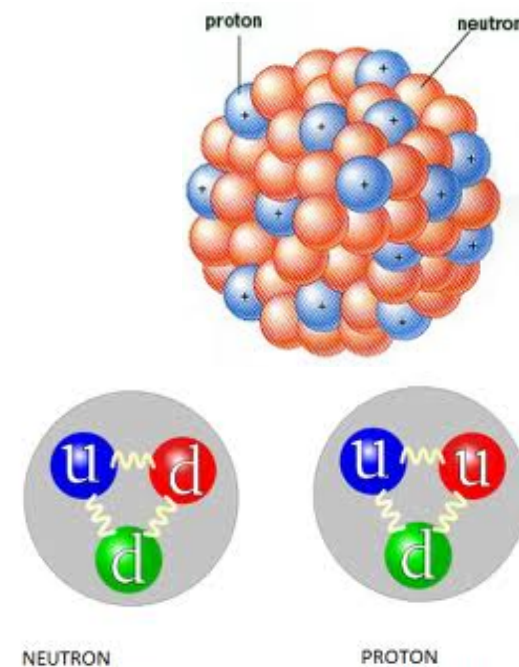
Močna sila

- veže protone in nevtrone v jedra
(pozitivno nabiti protoni bi se v nasprotnem primeru zaradi električne sile razbežali)
- najmočnejša med 4 osnovnimi silami
- veže 3 kvarke v proton oziroma nevtron
- splošno: veže kvarke v hadrone
- na razdaljah nekaj fm od jedra njen vpliv zanemarljiv

osnovne sile:

- elektro-magnetna
- močna
- gravitacijska
- šibka

Quarks	2.4 MeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	1.27 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	171.2 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top
	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom
Leptons	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e electron	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ tau



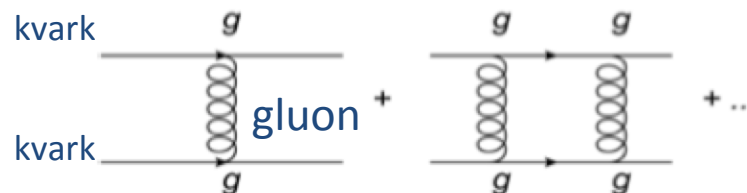
Povzetek

- Zakaj je teoretični študij hadronov zavhteven in deloma se nerešen ?
Ali znamo izračunati maso protona, nevtrona in drugih hadronov ? DA
- Večina hadronov hitro razpade zaradi močne sile.
Ali znamo izračunati njihovo maso in razpadni čas ? DA, za nekatere
- Neobičajni hadroni

Teoriji močne in EM sili sta znani (navajam osnovne enacbe za občutek)

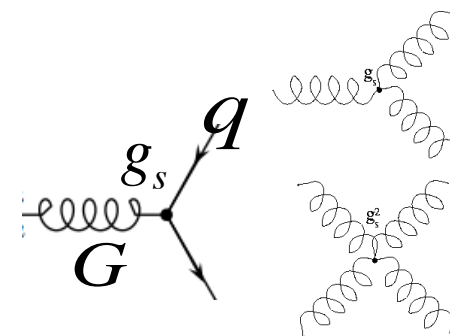
Močna sila

med **kvarki (q)** in **gluoni (G)**



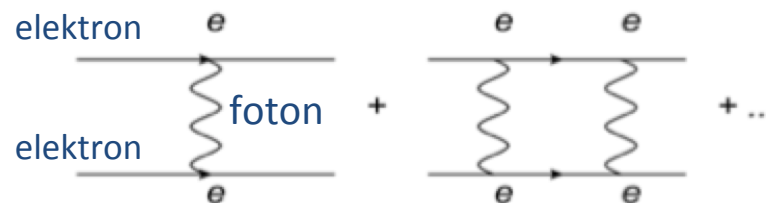
$$L_{QCD} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F_a^{\mu\nu} + \sum_{q=u,d,s,c,b,t} \bar{q} i \gamma_\mu (\partial^\mu + i g_s G_a^\mu T^a) q - m_q \bar{q} q$$

$$F_{\mu\nu}^a = \partial_\mu G_\nu^a - \partial_\nu G_\mu^a - g_s f^{abc} G_b^\mu G_c^\nu$$



Elektro-magnetna sila

med **elektroni (e)** in **fotoni (A)**



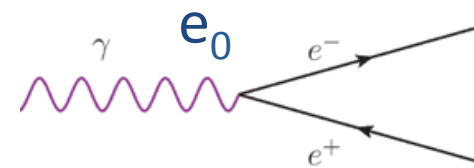
$$L_{QED} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \sum_{q=u,d,s,c,b,t} \bar{e} i \gamma_\mu (\partial^\mu + i e_0 A^\mu) e - m_e \bar{e} e$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

$$A_\mu = (\phi, \vec{A})$$

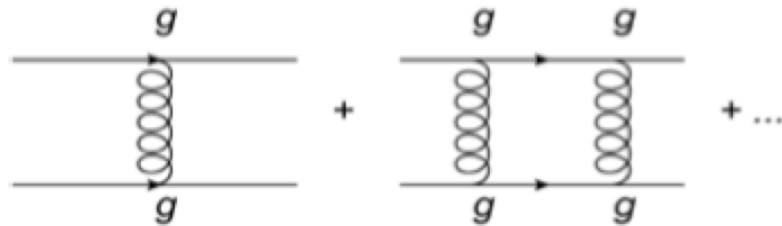
$$\vec{E} = -\text{grad}(\phi)$$

$$\vec{B} = \text{rot}(\vec{A})$$



Zakaj je teoretična obravnava močne sile : zahtevna elektromagnetne sile : nezahtevna

Močna sila



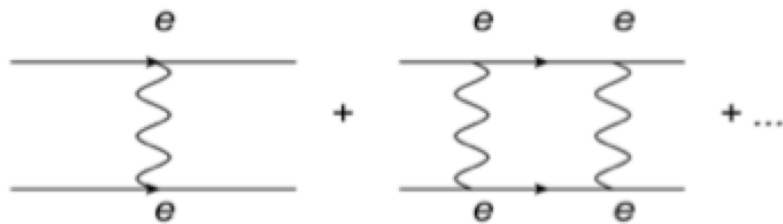
$g \approx 1$

ne-zanemarljivo

$$\text{verjetnost} = | A_2 g^2 + A_4 g^4 + A_6 g^6 + \dots |^2$$

sešteti moramo "vse rede" (ne-perturbativno)

Elektro-magnetna sila



$$\text{verjetnost} = | B_2 e_0^2 + B_4 e_0^4 + B_6 e_0^6 + \dots |^2$$

$e_0 = \text{majhen}$

$e_0 = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$

zanemarljivo

zanemarljivo

Ne-perturbativni studij temelji na Feynmanovem popotnem integralu

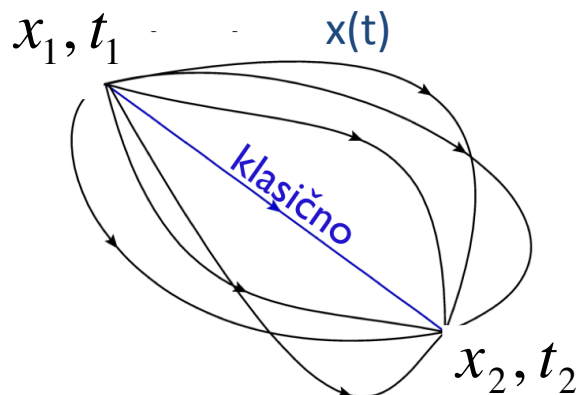
Kvantna mehanika

$$L = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 - V(x)$$

$$S = \int_{t_1}^{t_2} dt L \quad \text{odvisna od } x(t)$$

verjetnost za $x_1(t_1) \rightarrow x_2(t_2)$

$$P \propto \sum_{\text{vse poti } x(t)} e^{i S / \hbar}$$

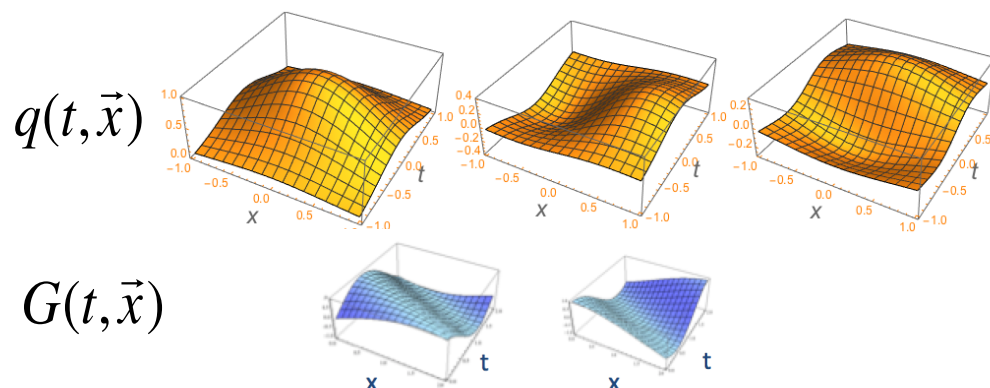


Kvantna teorija polja: teorija močne interakcije

$$L = -\frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu} + \bar{q} i \gamma_\mu (\partial^\mu + i g_s G_a^\mu T^a) q - m_q \bar{q} q$$

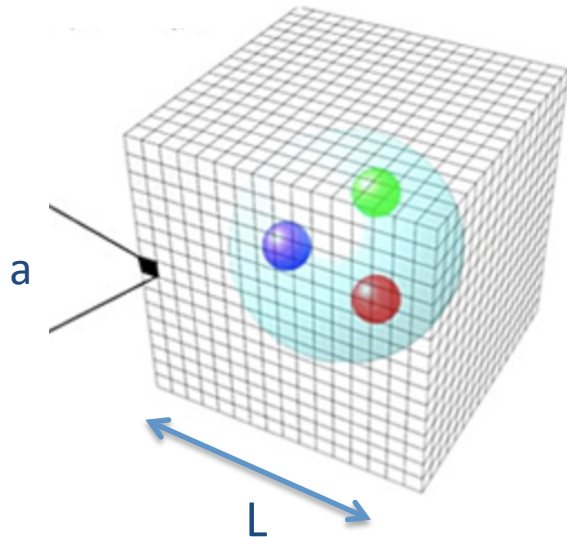
$$S = \int dt d\vec{x} L \quad \text{odvisna od } q(t, \vec{x}), G(t, \vec{x})$$

$$P \propto \sum_{\text{vsa polja } q(t, x), G(t, x)} e^{i S / \hbar}$$



Študij močne interakcije na mreži (eng lattice)

Kvantna teorija polja: teorija močne sile



tipicno

$$a \approx 0.1 \text{ fm}$$

$$L \approx 40 a, V = 40^4$$

na koncu :

$$a \rightarrow 0$$

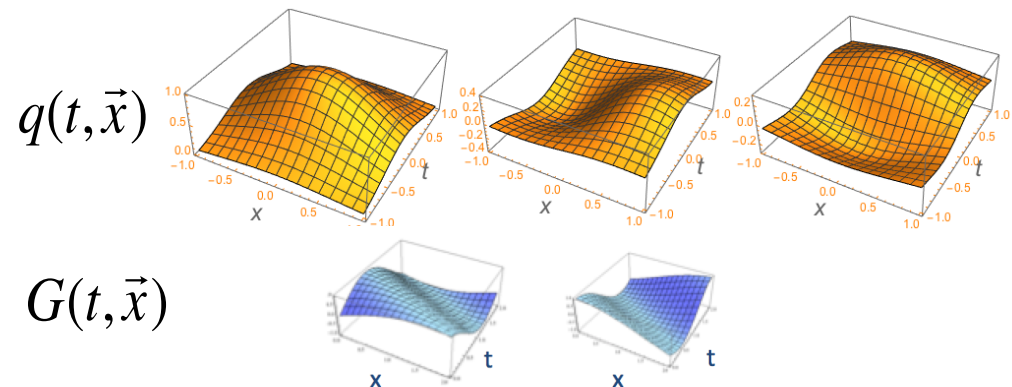
$$L \rightarrow \infty$$

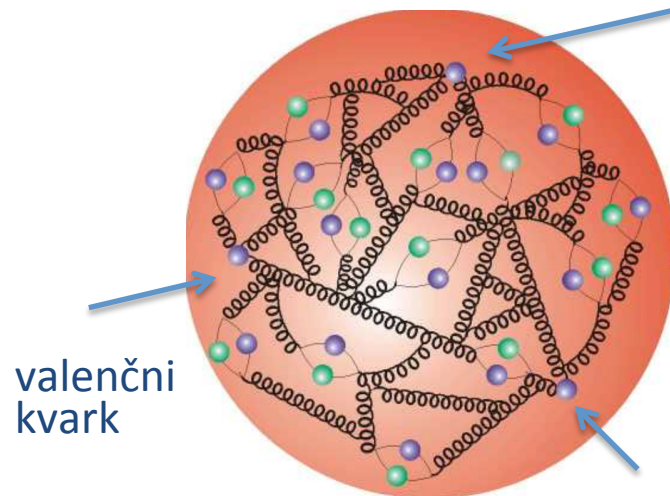
$$L = -\frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu} + \bar{q} i \gamma_\mu (\partial^\mu + i g_s G_a^\mu T^a) q - m_q \bar{q} q$$

$$S = \int dt d\vec{x} L \quad \text{odvisna od } q(t, \vec{x}), G(t, \vec{x})$$

$$P \propto \sum e^{i S / \hbar}$$

vsa polja $q(t, x), G(t, x)$





Masa protona in nevtrona predstavljata 99% mase vidnega vesolja

Higgsov mehanizem je odgovoren za zelo majhen prispevek

Večina mase je posledica močne interakcije med kvarki

$$m_u c^2 \approx 2 \text{ MeV} \quad m_d c^2 \approx 5 \text{ MeV}$$

Teoretični študij na mreži

$$m_p c^2 = m_n c^2 = 936 \pm 25 \pm 22 \text{ MeV}$$

le močna sila, brez EM sile, $m_u = m_d$

[BMW collaboration, Science 322, 2008]

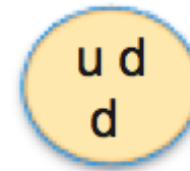
$$m_n c^2 - m_p c^2 = 1.51 \pm 0.16 \pm 0.23 \text{ MeV}$$

močna in EM sila, $m_u \neq m_d$

BMW collaboration, Science 347, 2015

Eksperiment

$$m_p c^2 \approx 938.3 \text{ MeV} \quad m_n c^2 \approx 939.5 \text{ MeV}$$



$$m_n c^2 - m_p c^2 = 1.293 \text{ MeV}$$

$$1 \text{ MeV} = 1000000 \text{ eV}$$

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Običajni hadroni



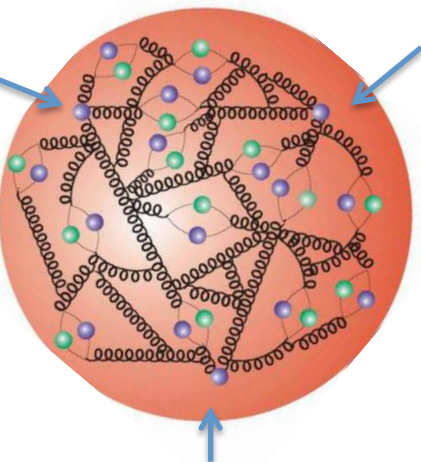
Normal baryon



Normal meson

valenčni
kvark

+ gluoni
+ pari $\bar{q}q$



x

	I	II	III
Masse	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Name	u up	c charm	t top
Quarks	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	d down	s strange	b bottom

- različni okusi
- različne orientacije spinov
- različne orbitalne Γ
- različna radialna vzbujena stanja



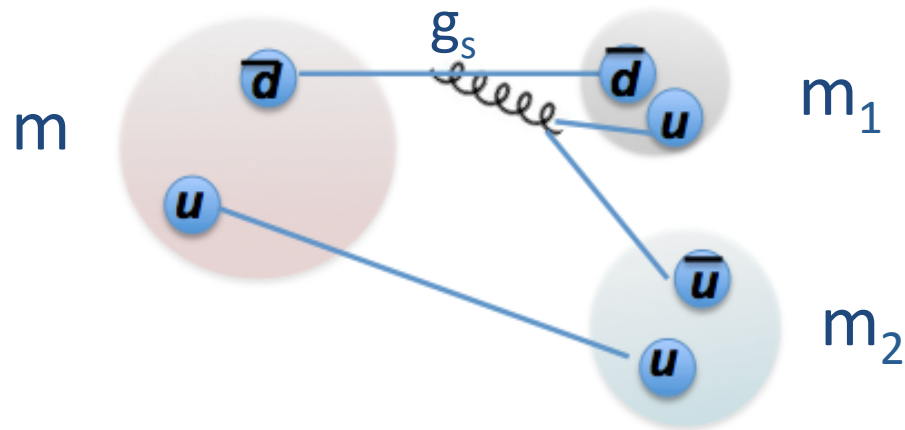
veliko število barionov in mezonov

Živalski vrt (večinoma običajnih) hadronov

$\bar{c}c$	$\bar{u}u$	$\bar{s}u$	$\bar{c}u$	uud
$\eta_c(1S)$	$\pi^\pm$	$K^\pm$	$D^\pm$	p
$J/\psi(1S)$	π^0	K^0	D^0	n
$\chi_{c0}(1P)$	η	K_S^0	$D^{*+}(2007)^0$	$N(1440) 1/2^+$
$\chi_{c1}(1P)$	$f_0(500)$ or σ was $f_0(600)$	K_L^0	$D^{*+}(2010)^\pm$	$N(1520) 3/2^-$
$h_c(1P)$	$\rho(770)$	$K_0^*(800)$ or κ	$D_0^{*+}(2400)^0$	$N(1535) 1/2^-$
$\chi_{c2}(1P)$	$\omega(782)$	$K^*(892)$	$D_0^{*+}(2400)^\pm$	$N(1650) 1/2^-$
$\eta_c(2S)$	$\eta'(958)$	$K_1(1270)$	$D_1(2420)^0$	$N(1675) 5/2^-$
$\psi(2S)$	$f_0(980)$	$K_1(1400)$	$D_1(2420)^\pm$	$N(1680) 5/2^+$
$\psi(3770)$	$a_0(980)$	$K^*(1410)$	$D_1(2430)^0$	$N(1685) ??$
$X(3872)$	$\phi(1020)$	$K_0^*(1430)$	$D_2^{*+}(2460)^0$	$N(1700) 3/2^-$
$\chi_{c0}(2P)_{wa}$	$h_1(1170)$	$K_2^*(1430)$	$D_2^{*+}(2460)^\pm$	$N(1710) 1/2^+$
$\chi_{c2}(2P)$	$b_1(1235)$	$K(1460)$	$D(2550)^0$	$N(1720) 3/2^+$
$X(3940)$	$a_1(1260)$	$K_2(1580)$	$D^*(2600)$	$N(1860) 5/2^+$
$\psi(4040)$	$f_2(1270)$	$K(1630)$	$D^*(2640)^\pm$	$N(1875) 3/2^-$
$X(4050)^\pm$	$f_1(1285)$	$K_1(1650)$	$D(2750)$	$N(1880) 1/2^+$
$X(4140)$	$\eta(1295)$	$K^*(1680)$		$N(1895) 1/2^-$
$\psi(4160)$	$\pi(1300)$	$K_2(1770)$		$N(1900) 3/2^+$
$X(4160)$	$a_2(1320)$	$K_3^*(1780)$		$N(1990) 7/2^+$
$X(4250)^\pm$	$f_0(1370)$	$K_2(1820)$		$N(2000) 5/2^+$
	$h_1(1380)$	$K(1830)$		$N(2040) 3/2^+$
	$\pi_1(1400)$			$N(2060) 5/2^-$
	$\eta(1405)$			$N(2100) 1/2^+$
	$f_1(1420)$			
	$\omega(1420)$			
	$f_2(1430)$			
	$a_0(1450)$			
	$\rho(1450)$			

...

Večina hadronov hitro razpade preko močne sile

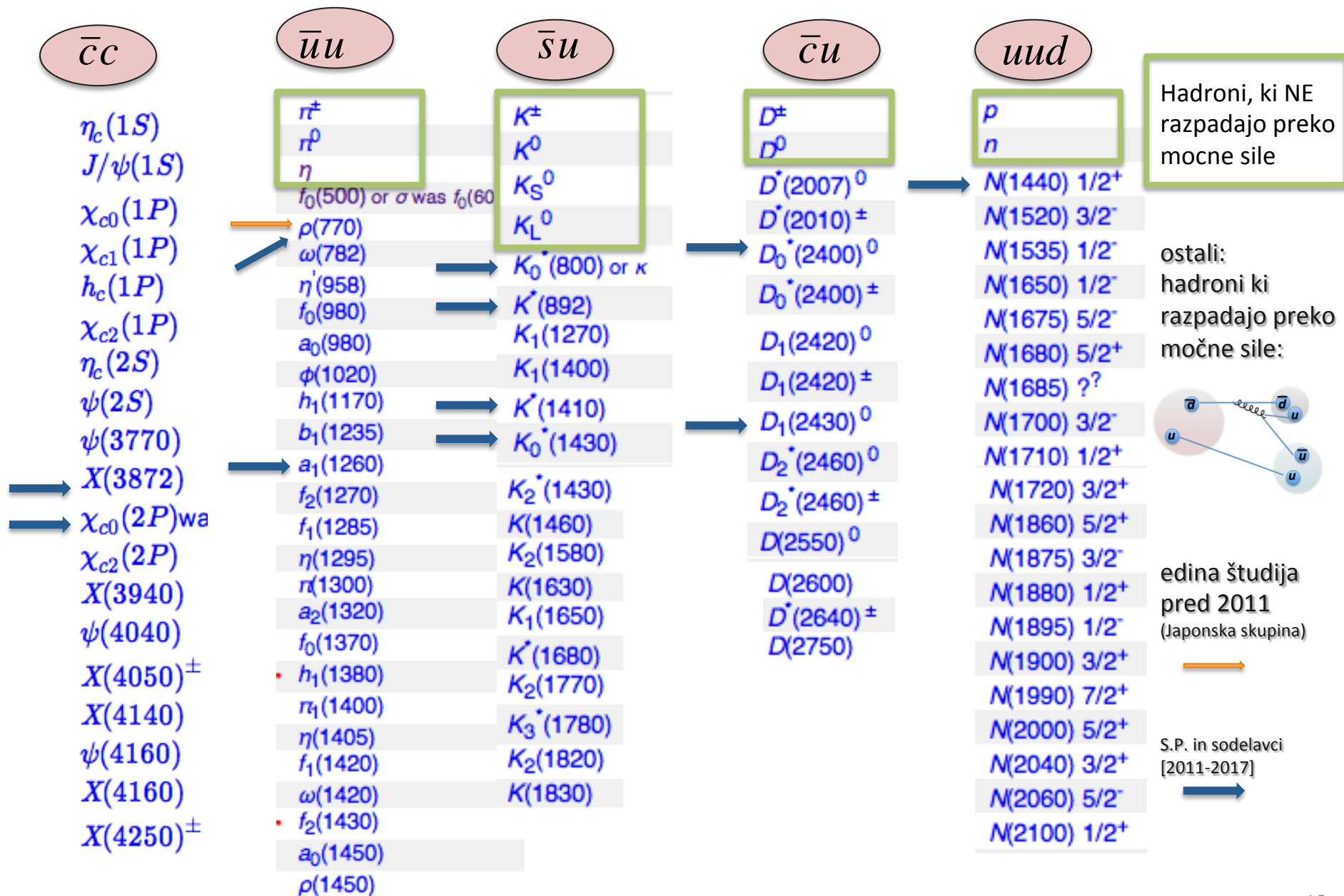


Razpad preko močne sile je mogoč če

$$m > m_1 + m_2 \quad (m_1 + m_2 \text{ imenujemo "prag"})$$

in če se pri razpadu ohranjajo ustrezna kvantna [tevila

Večina hadronov razpada preko močne sile



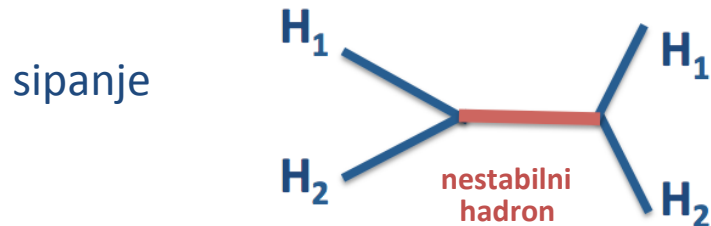
Kako zaznati hadrone, ki razpadajo preko močne sile

Heisenbergovo načelo nedoločenosti

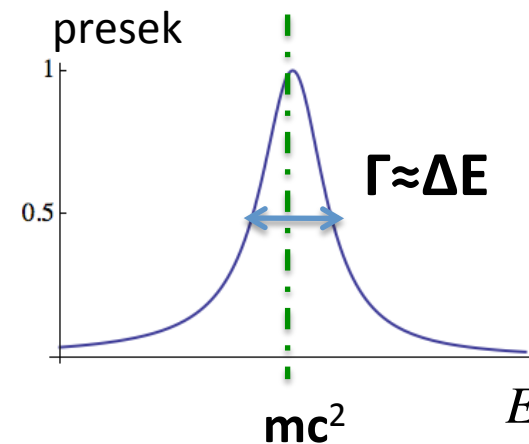
$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{1}{2} \hbar \quad \hbar = h / 2\pi \approx 1.05 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{1}{2} \hbar$$

$$\Gamma \cdot \tau = \hbar$$

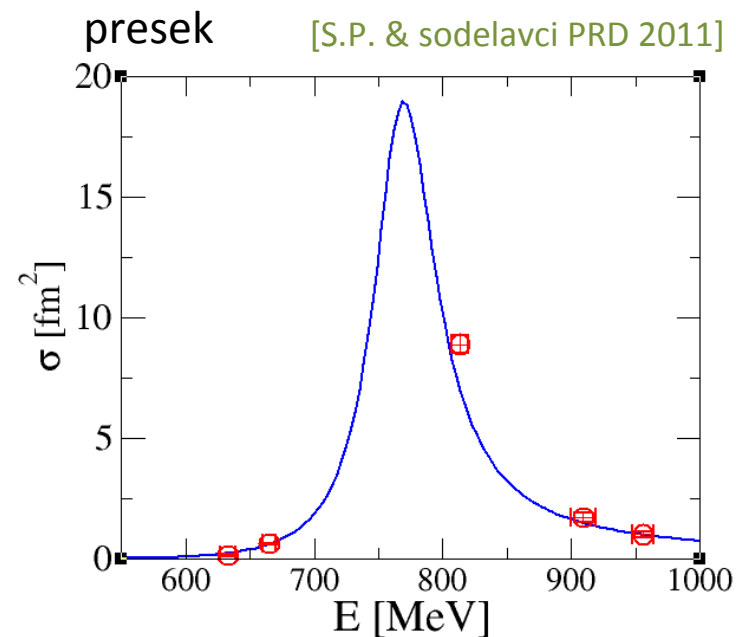
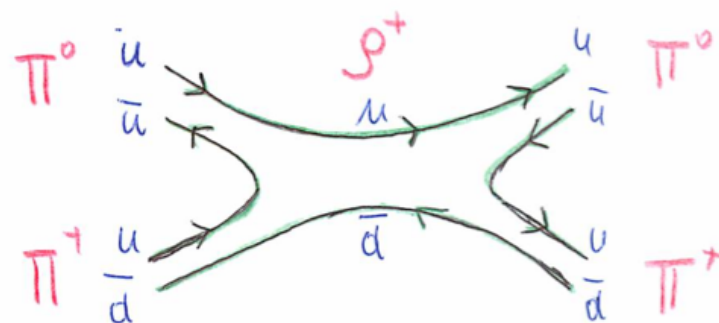


v eksperimentu jih odkrijejo
kot vrhove v preseku pri sipanju



$$\text{presek} \propto \frac{N_{sip}}{t N_{vp}}$$

Teoretični študij sipanja na mreži

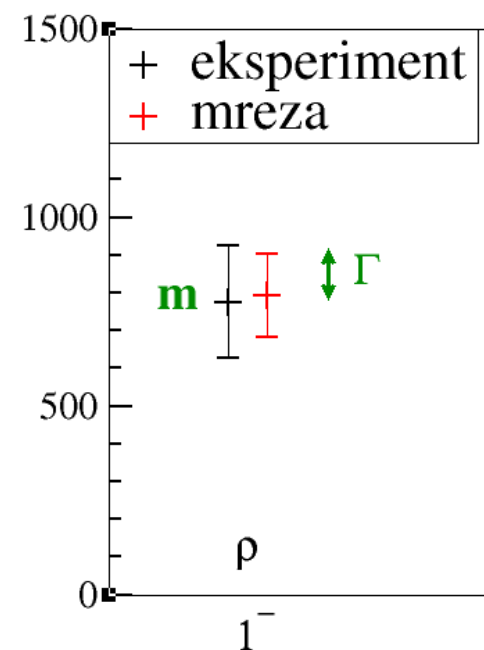
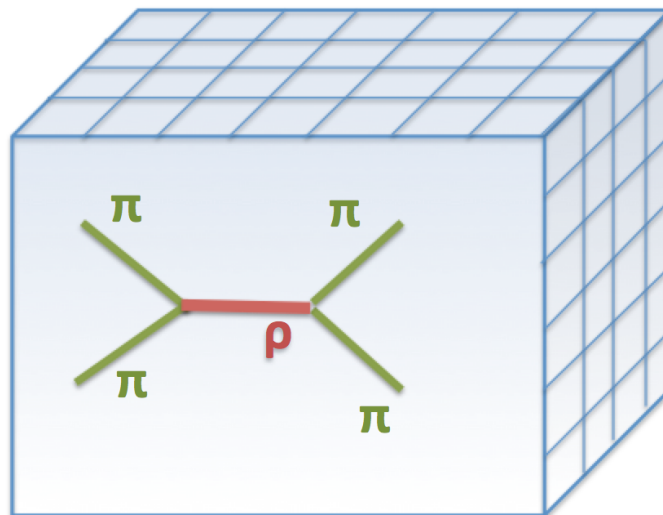


rigorozna analitična zveza
za določitev preseka iz
lastnih energij na mreži:

Luscher (1991)

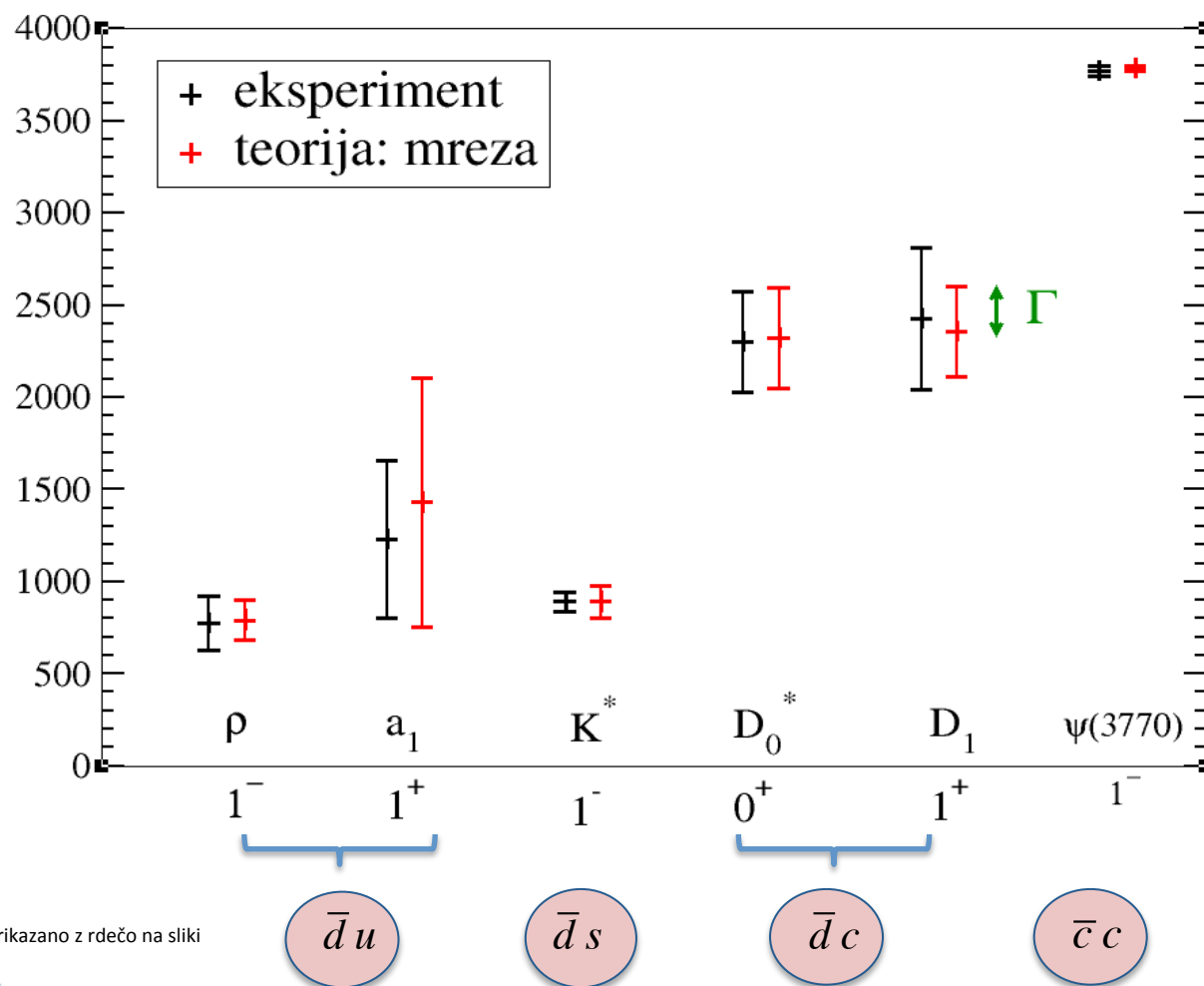
posplošitev za $m_1 \neq m_2$:

S.P., Leskovec (2012)



Masa (m) in širina (Γ) hadronov ki razpadajo preko močne sile

$m c^2$ [MeV]



prikazano z rdečo na sliki



$$\Gamma = \Gamma^{\text{mreza}} \frac{F^{\text{exp}}}{F^{\text{mreza}}}$$

$F = \text{fazni-prostor} \propto p^L / E$

$$m_u \cong m_d < m_s < m_c$$

S. Prelovšek Komelj: Kvarki, močna sila in hadroni

S.P. & sodelavci

PRD 2011, PRD 2012, PRD 2013

JHEP 2014, JHEP 2014



Prvi teoretični izračuni
za razpadne čase
hadronov s kvarki s ali c

(v mislih imamo razpade preko močne sile in
izračune ab-initio na mreži)

razpadni čas hadrona

$$\tau = \frac{\hbar}{\Gamma}$$

Običajni in neobičajni hadroni

običajni



Normal baryon

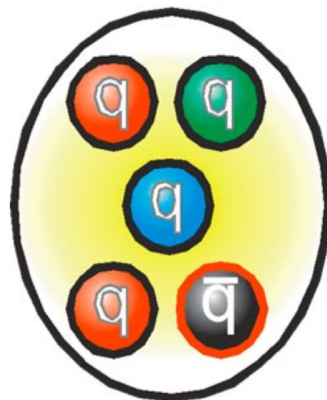


Normal meson

x

neobičajni

(neopaženi pred 2003)



Pentaquark



Tetraquark

	I	II	III
Masse	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Name	u up	c charm	t top
Quarks	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4,2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom

Neobičajni hadroni

Vsi eksperimentalno odkriti neobičajni hadroni
razpadejo preko močne sile

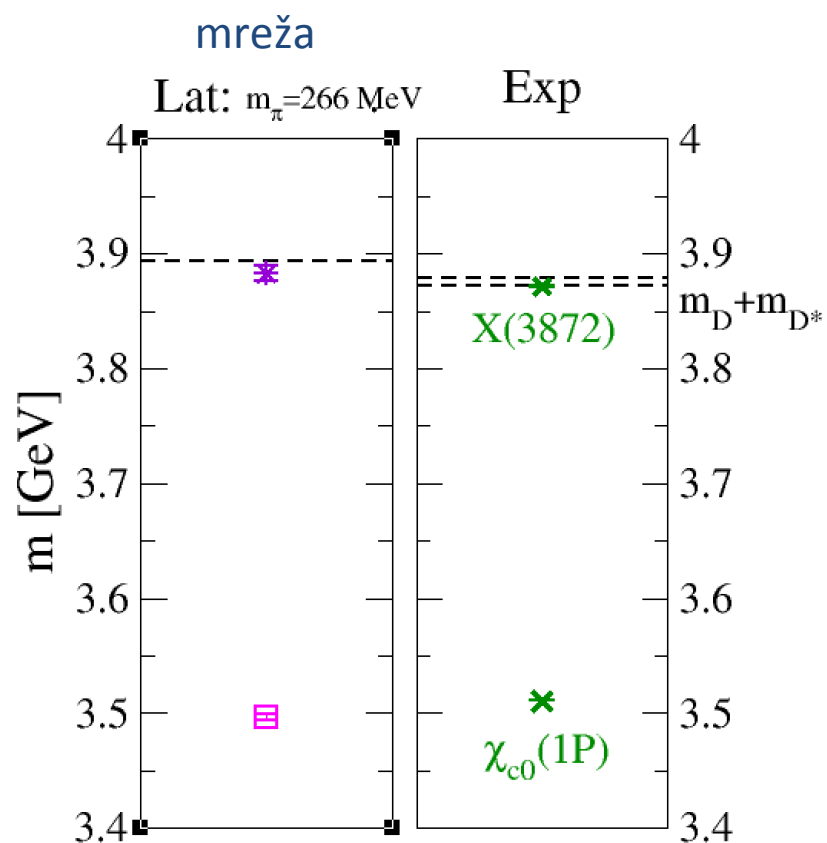
X(3872)

[S.P., L. Leskovec, Phys. Rev. Let. 2013]

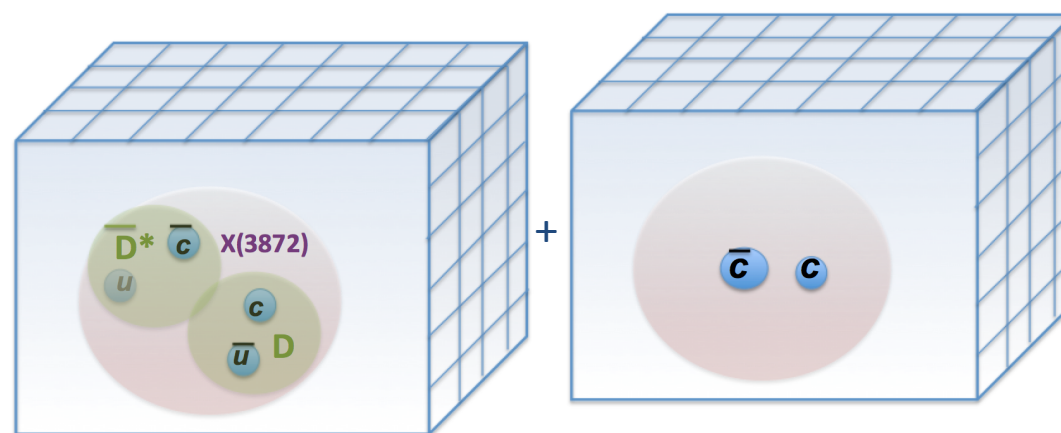
[Padmanath, Lang, S.P., PRD 2015]

Odkritje 2003: Belle, prvo eksperimentalno odkrito neobičajno hadronsko stanje

Naša simulacija: prvi teoretični dokaz za obstoj tega stanja na mreži



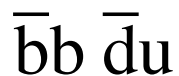
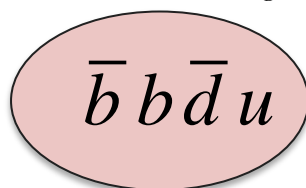
Odkrijemo, da je stanje X(3872) linearna kombinacija



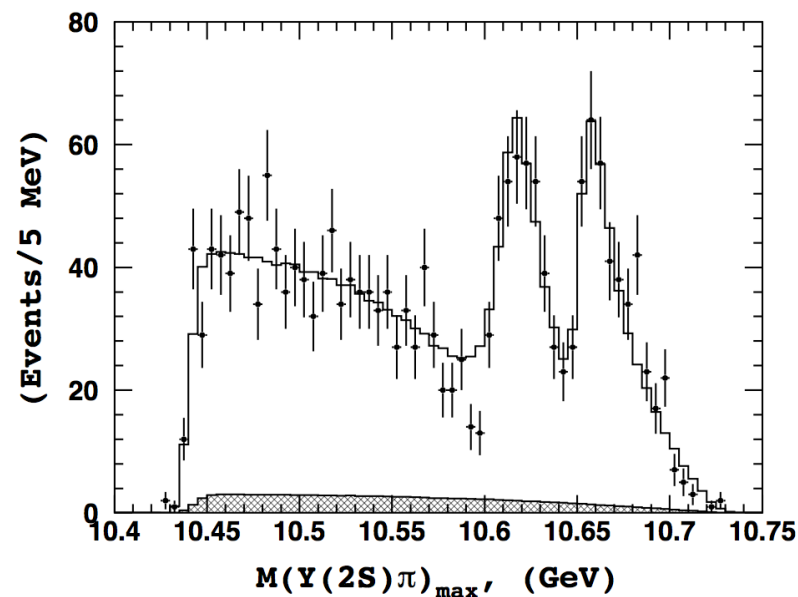
ki botruje nenavadnim lastnostim
($m \approx m_D + m_{D^*}$)

Z_b tetraquark

$$Z_b^+ \rightarrow \Upsilon \pi^+$$

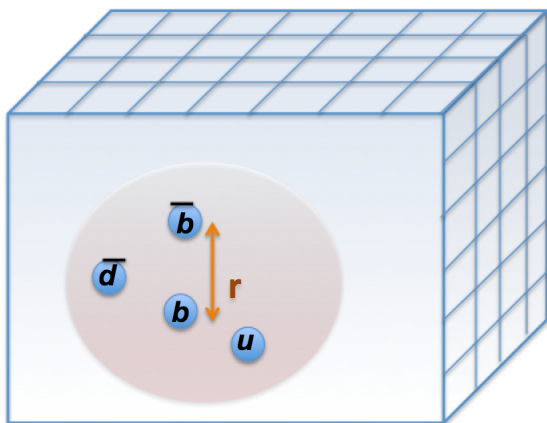


[Belle, PRL 2011]

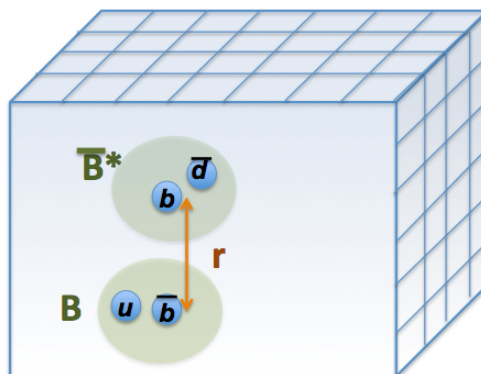


simulacija na mreži:

[S.P., Bahtiyar, Petkovic, 1909.02356]

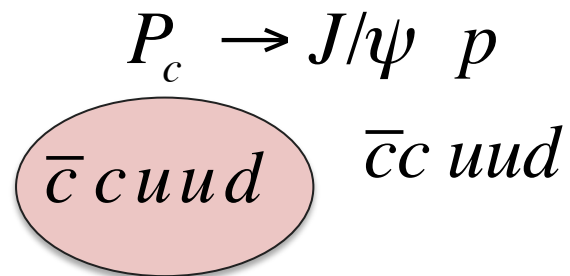


Odkrijemo privlačno silo
med gradnikoma B in B*



Ta privlačna sila vodi
do vezanega stanja z maso
 $m \approx m_B + m_{B^*} \approx 10.6 \text{ GeV}$,
ki je verjetno povezan z
vrhom Z_b v eksperimentu

P_c pentakvark

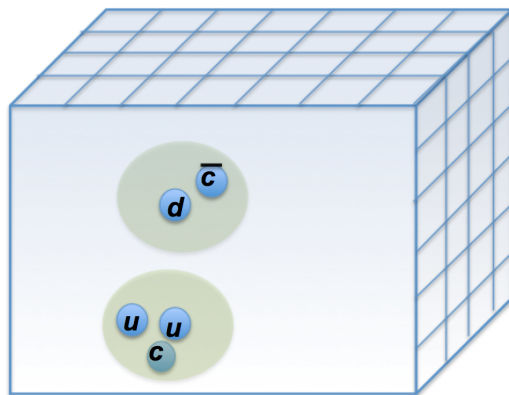
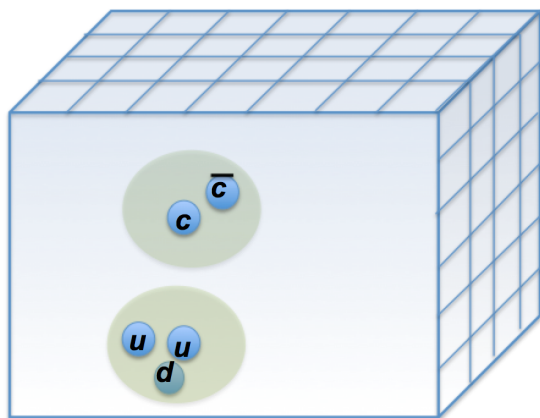


[U. Skerbis, S.P., PRD 2019]

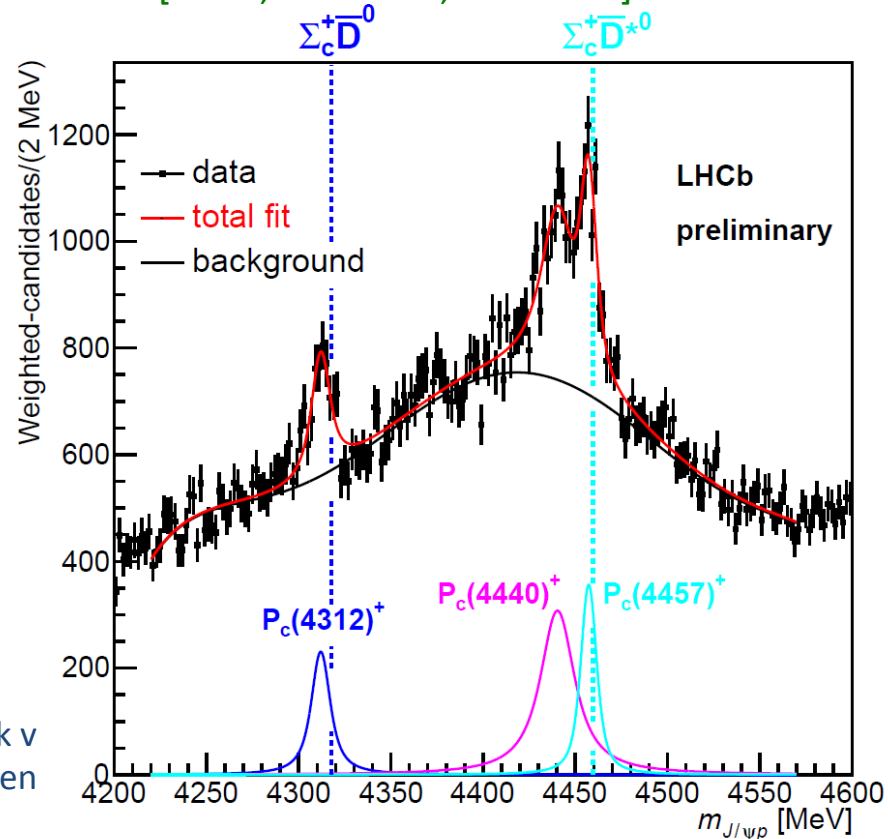
Prvi teoretični študij P_c na mreži

Ugotovimo, da ta konfiguracija ni dovolj privlačna za obstoj pentakvarka

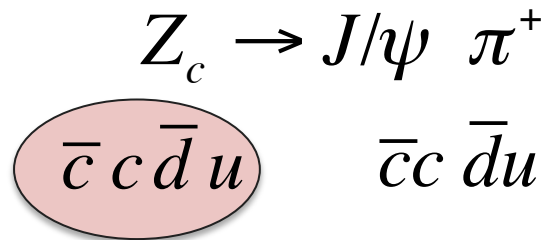
To nakazuje, da je privlak v tej konfiguraciji odgovoren za obstoj pentakvarka



[LHCb, PRL 2015; PRL 2019]



Z_c tetraquark



[S.P., Leskovec, PLB 2013]

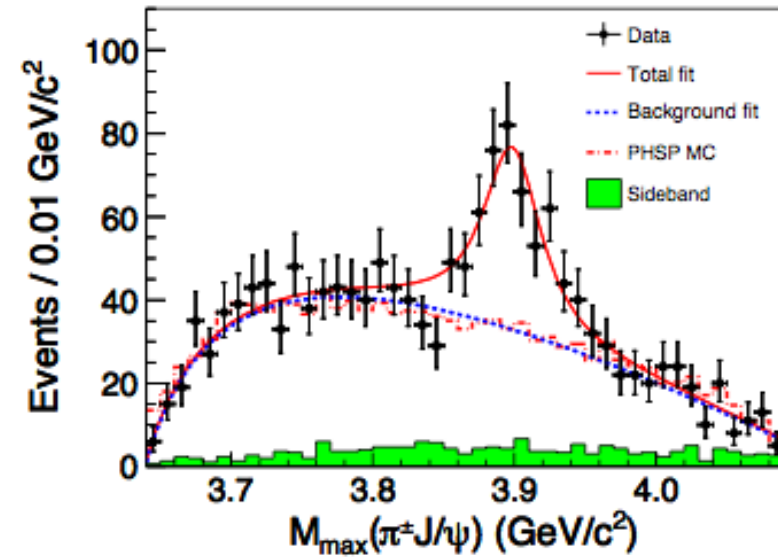
[S.P., Lang, Mohler, Leskovec, PRD 2015]

Prva teoretična študija tega stanja na mreži.

Nismo še teoretično razvozlali zakaj to hadronsko stanje obstaja.

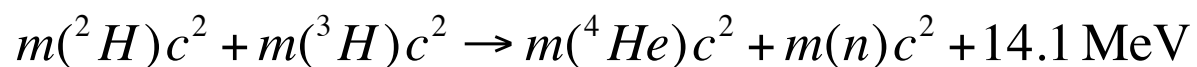
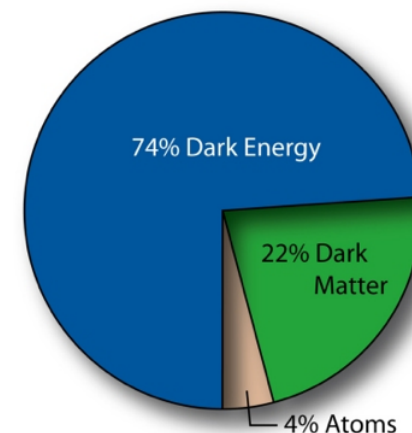
Mnogi izzivi ostajajo ...

[BESIII, Belle, PRL 2013]



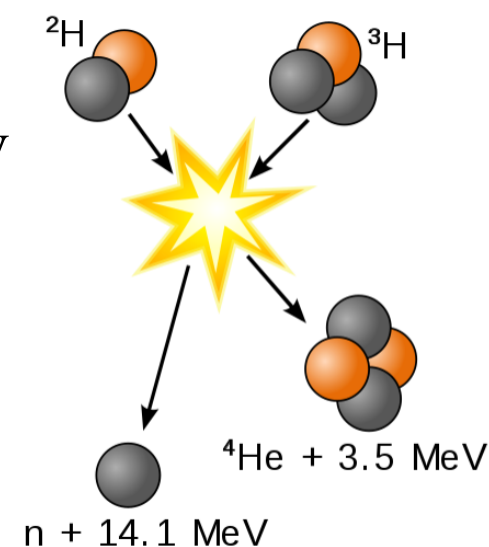
Zaključki

- 99% mase vidnega vesolja predstavljata masa protona in nevtrona
- 99% mase protona in nevtrona je posledica močne interakcije med kvarki
- maso protona in nevtrona lahko izračunamo
- obstaja mnogo vrst hadronov in tudi nekatere njihove mase in razpadne čase lahko izračunamo
- energija na Zemlji izvira iz fuzije na Soncu



Energija 14 MeV se sprosti le ker so vezavne energije začenih jeder različne od vezavne energije končnih jeder.

Vezavne energije pa so posledica močne sile.



Barvni naboj v močni interakciji

- kvarki: 3 možnosti : rdeč, moder, zelen
- gluoni: 8 možnosti (dvobarvni, sestavljeni iz osnovnih 3 barv)

