

1 Uvod

Pri opisu naravnih pojavov lahko naravo razdelimo v *nadstropja*. Nadstropje ima značilne razsežnosti in energijsko skalo ter značilne gradnike, katerih notranjo strukturo lahko zanemarimo. Ko opisujemo pojave v nadstropju, se običajno ni treba ozirati na dogajanja v višjih ali nižjih nadstropjih. Tu se bomo zanimali za najnižja nadstropja narave. V jedrski fiziki in fiziki delcev govorimo o treh nadstropjih:

Nizke energije – Opisujemo dogajanja v jedru pri energijah od nekaj MeV do nekaj deset MeV; značilne razdalje so razsežnosti atomskih jeder. Za opis pojavov zadoščata *točkasta nukleona* – proton in nevtron. Interakcijo med gradnikoma opišemo s potencialom, ki spominja na Van der Waalsovo interakcijo med atomi.

Srednje energije – Energijska skala v tem področju sega od 100 MeV do približno 1 GeV, značilna razdalja je velikost nukleona (~ 0.5 fm). Gradniki so *barioni*, poleg nukleonov predvsem delec Δ , in *mezoni*, ki so nosilci interakcije. Barionov ne moremo več obravnavati kot točkaste delce.

Visoke energije – Energije so prek 1 GeV; gradniki so *kvarki* in *gluoni*.

Poleg naštetih gradnikov so v vseh treh nadstropjih še *leptoni*, ki med seboj in z drugimi delci sodelujejo s šibko in elektromagnetno interakcijo.

Obstaja morda še nižje nadstropje? Zaenkrat se zdi, da so kvarki in leptoni elementarni delci, saj noben poskus ne pokaže, da bi imeli notranjo strukturo. Vendar dejstvo, da se pojavljajo v generacijah, ki se znatno razlikujejo po masah, daje slutiti obstoj nižjega nadstropja.

Za sedaj torej lahko privzamemo, da so osnovni gradniki narave *leptoni* in *kvarki*. Poleg teh gradnikov je za opis potrebno poznati tudi interakcijo med njimi in delce – bozone – ki so nosilci interakcije. Med kvarki in leptoni vladajo tri vrste interakcij: *močna*, ki kvarke veže v hadrone, *šibka*, ki je v jedrski fiziki odgovorna za razpad β , in *elektromagnetna*, ki deluje med nabitimi delci in jo dobro poznamo iz makroskopskega sveta. Nismo navedli *gravitacije*, saj je mnogo šibkejša od naštetih treh in jo pri naši obravnavi lahko zanemarimo. Osnovne gradnike in interakcije med njimi opišemo s *standardnim modelom*.

S standardnim modelom in z modeli, ki so iz njega izpeljani, želimo:

- opisati trke in reakcije med osnovnimi delci,
- pojasniti velikosti mas, razsežnosti in druge statične lastnosti hadronov,
- opisati interakcijo med barioni, predvsem pri razdaljah, ki so primerljive z razsežnostjo delcev,
- raziskati, pri katerih pojavih v jedru so pomembne kvarkovske prostostne stopnje.

2 Standardni model

Standardni model je splošno privzet model za opis osnovnih gradnikov in interakcij med njimi. Poleg kvarkov in leptonov, ki so fermioni s spinom $1/2$, so v modelu še

bozoni s spinom 1, ki so nosilci močne, šibke in elektromagnetne interakcije. V okviru standardnega modela želimo *enotno* opisati delce in interakcije. Za sedaj je uspelo Glashowu, Weinbergu in Salamu poenotiti šibko in elektromagnetno interakcijo; enotna teorija vseh treh interakcij je še v špekulativni obliki in je še niso sprejeli v standardni model. Poglejmo najprej nekoliko podrobneje osnovne značilnosti gradnikov.

2.1 Leptoni

Kot smo že povedali, so leptoni fermioni s spinom $1/2$, ki sodelujejo s šibko in, če so nabiti, z elektromagnetno interakcijo. Najbolj znani so *elektron* e^- , *pozitron* e^+ , *nevtrino* ν_e in *antinevtrino* $\bar{\nu}_e$. V jedrski fiziki nevtrine srečamo pri β -razpadih, na primer pri razpadu nevtrona:



Pri opisu leptonov moramo navesti še tretjo komponento spina; običajno izberemo bazni stanji s komponento z enako $+1/2$ in $-1/2$. Če izberemo os z vzporedno z gibalno količino delca, lahko spin gleda v isti smeri (govorimo o pozitivni *sučnosti* ali o *desnosučnih* delcih), ali v nasprotni smeri (negativna sučnost – *levosučni* delci). V naravi srečamo le *levosučne* nevtrine in *desnosučne* antinevtrine. Posledica tega je, da se pri šibkih razpadih parnost ne ohranja: zrcalna podoba pojava v naravi ni možna.

Podobno kot tvorita proton in nevtron izospinski dublet, lahko leptone razvrstimo v dublete in singlete, ki pripadajo *šibkemu izospinu*. *Osnovni dublet* tvorita levosučna elektron in nevtrino, desnosučni elektron pa ostane brez para in ustreza *osnovnemu singletu*:

$$L = \begin{pmatrix} \nu_e \\ e_L^- \end{pmatrix}, \quad D = (e_R^+). \quad (2)$$

Poleg osnovnih multipletov obstajata še dve generaciji leptonov. Znani leptoni in njihove lastnosti so prikazani v tabeli (2.1).

oznaka	ime	naboj	mirovna energija	življenjski čas
ν_e	elektronski nevtrino	0	$< 2 \text{ eV}$	stabilen
e^-	elektron	$-e_0$	0,511 MeV	stabilen
ν_μ	mionski nevtrino	0	$< 0,19 \text{ MeV}$	stabilen
μ^-	mion	$-e_0$	105,66 MeV	$2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$
ν_τ	taonski nevtrino	0	$< 18 \text{ MeV}$	
τ^-	tau	$-e_0$	1,778 GeV	$3,0 \cdot 10^{-13} \text{ s}$
antileptoni: $\bar{\nu}_e, e^+, \bar{\nu}_\mu, \mu^+, \bar{\nu}_\tau, \tau^+$				

Tabela 1: Leptoni

2.2 Kvarki

Kvarke sta leta 1964 napovedala Gell-Mann in George Zweig. Ker kaže, da prostih kvarkov v naravi ni, je bilo to teoretično napoved težko eksperimentalno potrditi. Najpomembnejši eksperiment, ki potrjuje obstoj kvarkov z napovedanimi lastnostmi, je globoko neelastično sipanje elektronov na protonih. Za eksperiment so Friedman, Kendall in Taylor v letu 1990 prejeli Nobelovo nagrado.

Kvarki so fermioni s polovičnim spinom in nabojem, ki je mnogokratnik *tretjine* osnovnega naboja. Kvarke razdelimo v dublete, ki ustrezajo *močnemu izospinu*. Ker se bomo pri nadaljnji obravnavi ukvarjali predvsem s kvarki, bomo močni izospin na kratko imenovali kar izospin. Osnovni dublet sestavljata kvark u z nabojem $2e_0/3$ in kvark d z nabojem $e_0/3$. Podobno kot leptoni se tudi kvarki pojavljajo v treh generacijah. Lastnosti so prikazane v tabeli (2.2). Lahka kvarka sta stabilna v protonu; v težjih delcih lahko šibko razpadata, kvark d v kvark u ali obratno. Ker prostih kvarkov ni v naravi, njihovih lastnosti ne moremo neposredno izmeriti, lahko pa jih določimo preko lastnosti mezonov, ki jih kvarki sestavljajo.

oznaka	ime (okus)	naboj	mirovna energija	življenjski čas
d	{ lahka kvarka	$-e_0/3$	$\sim 5 \text{ MeV}$	(stabilen)
u		$2e_0/3$	$\sim 2 \text{ MeV}$	(stabilen)
s	čudni	$-e_0/3$	$\sim 110 \text{ MeV}$	$\sim 10^{-10} \text{ s}$
c	čarobni	$2e_0/3$	$\sim 1,25 \text{ GeV}$	$\sim 10^{-12} \text{ s}$
b	spodnji	$-e_0/3$	$\sim 4,5 \text{ GeV}$	$\sim 10^{-12} \text{ s}$
t	zgornji	$2e_0/3$	173 GeV	
antikvarci: $\bar{u}, \bar{d}, \bar{c}, \bar{s}, \bar{b}, \bar{t}$				

Tabela 2: Kvarci

Poleg lastnosti, ki smo jih navedli v tabeli, kvarke ločimo po naslednjih kvantnih številih:

Barva – Kvarci se ločijo po kvantnem številu, ki ga slikovito imenujemo *barva*. Kvantno število ima tri komponente: kvarki so lahko *rdeči* (*r*), *zeleni* (*g*) ali *modri* (*b*). Potrebo po uvedbi novega kvantnega števila bomo pojasnili v naslednjem poglavju.

Barionsko število – Barione sestavljajo trije kvarki različnih barv. Ker se število barionov v procesih ohranja, se mora ohraniti tudi število kvarkov. Kvarkom tako pripišemo barionsko število $B = 1/3$, antikvarkom pa $-1/3$.

Okus – Povedali smo, da kvarka u in d pripadata (močnemu) izospinskemu dubletu. Pogosto v skupino vključimo še čudni kvark, kvark s, in dobimo triplet, ki pripada *okusni* simetriji. Kot bomo videli v naslednjem poglavju, je ta simetrija pomembna pri razvrščanju hadronov in barionov v *multiplete*.

2.3 Bozoni

V kvantni teoriji elektromagnetne interakcije – *kvantni elektrodinamiki* (QED) – interakcijo med elektroni posreduje *foton*. Podobno kot kvantna elektrodinamika je zasnovana

oznaka	ime	naboj	mirovna energija	razpadna širina
γ	foton	0	0	stabilen
W^\pm	šibki bozon	$\pm e_0$	80.6 ± 0.4 GeV	2.25 ± 0.4 GeV
Z^0	šibki bozon	0	91.16 ± 0.14 GeV	2.35 ± 0.03 GeV
G_a	gluon ($a = 1, \dots, 8$)	0		

Tabela 3: Bozoni

Teorija močne interakcije med kvarki – *kvantna kromodinamika* (QCD) je zasnovana podobno kot kvantna teorija elektromagnetnega polja – *kvantna elektrodinamika* (QED). Namesto enega naboja v njej nastopa *osem barvnih nabojev* osem brezmasnih bozonov – *gluonov* – kot nosilcev interakcije med kvarki. Podobno je zasnovana teorija šibke interakcije; v njej nastopajo *trije šibki naboji* in trije bozoni W^\pm in W^0 . Vendar se tu pojavi pomembna razlika glede na močno in elektromagnetno interakcijo, saj imajo šibki bozoni veliko maso, kar v teoriji predstavlja bistveno težavo. Razrešili so jo Glashow, Weinberg in Salam v okviru poenotene teorije elektromagnetne in šibke interakcije. V tej teoriji vakuum ni prazen, temveč napolnjen s *Higgsovimi delci* in šibki bozoni se zaradi interakcije s temi delci obnašajo kot masni delci. Zaradi interakcije s poljem dobi nevtralni bozon W^0 še primes *prafotona*. Nevtralni šibki bozon, ki obstaja v naravi, potem označimo z Z^0 . Podobno je fizikalni foton linearna kombinacija bozona W^0 in prafotona. Pravimo, da so delci dobili maso na dinamičen način ali s *Higgsovimi mehanizmom*.

V tabeli so prikazane lastnosti bozonov, nosilcev omenjenih treh interakcij. Prostih gluonov – podobno kot kvarkov – ne srečamo v naravi.

3 Zgradba hadronov

3.1 Kvarkovski model barionov in mezonov

V kvarkovskem modelu predpostavimo, da so delci, ki jih srečamo v naravi, zgrajeni iz kvarkov in antikvarkov. *Barioni*, fermioni s spinom, ki je lih mnogokratnik $1/2$, so zgrajeni iz treh kvarkov, *mezoni*, bozoni s celoštevilčnim spinom, pa iz kvarka in antikvarka. Dejstvo, da se v naravi pojavljajo le gruče treh kvarkov, ne pa recimo dveh, pojasnimo z barvnim nabojem. Interakcijo med kvarki posredujejo gluoni, ki nosijo barvni naboj, zato je interakcija odvisna od barvnih stanj kvarkov. Kot bomo videli pozneje, potencialna energija dveh kvarkov z razdaljo narašča, zato v naravi prosti kvarki ne morejo obstajati. Enako velja za kvarke, povezane v gruče, razen če so gruče *barvno nevtralne*, kar pomeni, da vsebujejo enako število modrih, rdečih in zelenih kvarkov.

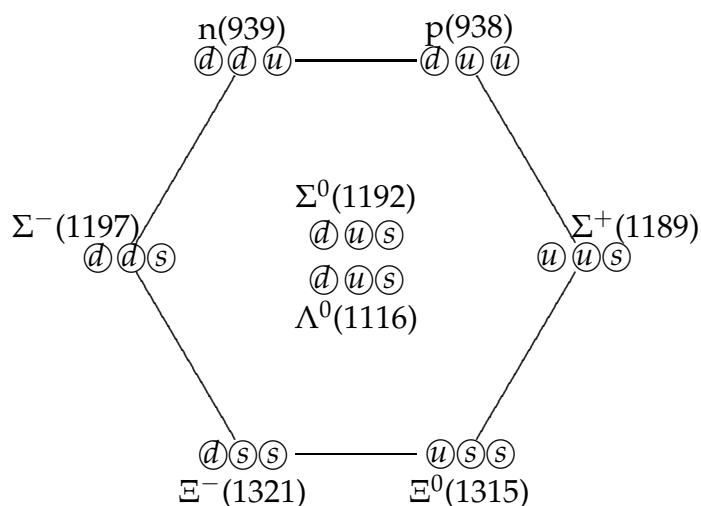
V naravi lahko torej srečamo le gruče, v katerih je število kvarkov mnogokratnik 3. Osnovne gruče s po tremi kvarki ustrezajo barionom, gruče s šestimi, devetimi, ... kvarki, pa atomskim jedrom. Barvno nevtralno gručo dobimo tudi tako, da vzamemo kvark in antikvark z nasprotno barvo. Takšne gruče ustrezajo mezonom.

Poglejmo najprej, katere barione lahko zgradimo iz osnovnega izospinskega dubleta kvarkov u in d . Dublet ustreza velikosti izospina $1/2$, kvark u ima tretjo komponento enako $1/2$, kvark d pa $-1/2$. Vsak kvark ima lahko še tretjo komponento spina $1/2$ ali $-1/2$. Na barvno kvantno število se ni potrebno ozirati, saj smo povedali, da mora vsak kvark imeti svojo barvo.

Tri kvarke sklopimo v izospinske *multiplete* z izospinom $1/2$ ali $3/2$. Enako velja za spin. Člani izospinskega multiplleta se ločijo po tretji komponenti izospina; multiplet z izospinom $3/2$ ima tako lahko štiri komponente, multiplet z izospinom $1/2$ pa dve. Prvi multiplet ustreza barionu Δ : štiri komponente izospina ustrezajo delcu z dvojnimi osnovnim nabojem (Δ^{++}), delcu z enojnim nabojem (Δ^+), nevtralnemu delcu (Δ^0) in delcu z negativnim električnim nabojem (Δ^-); drugi multiplet pa nukleonu: komponenta s projekcijo izospina $1/2$ protonu, druga z $-1/2$ pa nevtronu. Podobna shema velja za sklapanje v spinske multiplete. Vendar spinov ne moremo sklapanjati neodvisno od izospinov, temveč se določeni spinski multipleri kombinirajo le z izbranimi izospinskimi multipleri. Proton in nevtron se na primer tako pojavita le v spinskem dubletu. Razlog je v zahtevi, da je valovna funkcija fermionov *antisimetrična* na zamenjavo poljubnih dveh delcev.

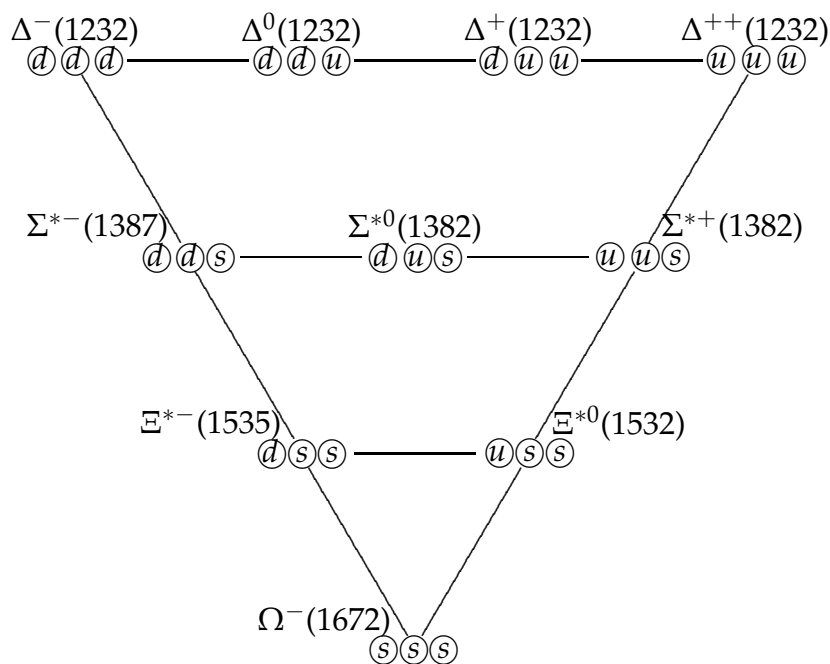
3.1.1 Multipleri barionov s čudnimi kvarki

Fizikalno zanimive multiplete dobimo, če izospinsko simetrijo razširimo z vključitvijo čudnega kvarka. Dobimo nova simetrijo, ki ji pravimo *okusna simetrija*. Multipleri bozonov in barionov, ki jih tako dobimo, so bili pomembna indikacija za obstoj kvarkov in napovedi njihovih lastnosti.



Slika 1: Oktet barionov s spinom $1/2$. V oklepaju so mirovne energije v MeV

Tri kvarke lahko sklopimo v tri okusne multiplete. Prvemu ustreza *singlet*, drugi vsebuje 8 bazičnih stanj (vaja) in ustreza *oktetu*, tretji vsebuje 10 stanj in pripada *deku-pletu*. Člani okteta imajo spin $1/2$, člani deku-pleta pa spin $3/2$.



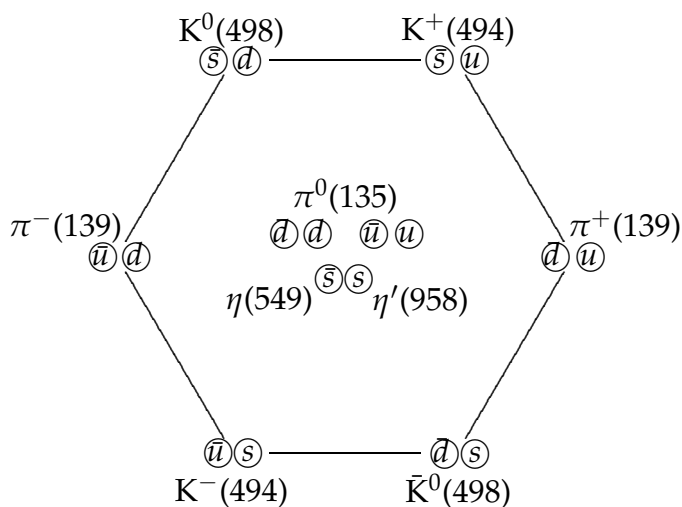
Slika 2: Dekuplet barionov s spinom 3/2.

Pri vsakem barionu navedemo njegovo oznako, mirovno energijo v MeV in okuse kvarkov, ki ga sestavljajo.

3.1.2 Mezoni

Povedali smo že, da mezone dobimo tako, da sklopimo kvark in antikvark v barvni singlet. Iz dimenzijskega preskusa $3^2 = 1 + 8$ se prepričamo, da vsak nastopa le po enkrat. Kar se tiče spina, lahko kvark in antikvark sklopimo v spin 0 (spinski singlet) in spin 1 (spinski triplet).

Mezoni, razvrščeni v multiplete, so prikazani na slikah.



Slika 3: Oktet in singlet mezonov s spinom 0.

3.2 Mase barionov in mezonov

Če bi bila okusna simetrija točna, bi bile mase delcev znotraj multiplleta enake. Masne razlike znotraj multiplleta lahko zadovoljivo pojasnimo s predpostavko, da je čudni kvark težji od kvarkov u in d za približno 120 MeV.

Kako pa lahko pojasnimo absolutno velikost mas barionov, saj sta kvarka u in d zelo lahka (lažja od 10 MeV)? V barionu in mezonu se kvarki gibljejo v povprečnem potencialu, ki ga ustvarjajo gluoni in drugi kvarki. Zato jim pripišemo neko *efektivno* maso, ki ima velikostni red 300 MeV za oba lahka kvarka in 450 MeV za čudni kvark. To maso pogosto imenujemo *konstituentno maso*.

Drugo vprašanje v zvezi z masami barionov in mezonov je povezano z masno razliko med multipletom, ki pripada spinu 3/2 in multipletu s spinom 1/2 pri barionih, ter z masno razliko med multiplletoma, ki pripadata spinoma 0 in 1 pri mezonih. Razliko pojasnimo, podobno kot v atomski fiziki, s *hiperfinim razcepom*. Tudi v atomih pride do razcepa stanj z različnim spinom, le da je pri barionih in posebno pri mezonih razcep znatno večji. Do energijske razlike pride zaradi interakcije med magnetnim poljem jedra in elektronovim magnetnim momentom. Pri kvarkih izvor ni v elektromagnetni interakciji, temveč v barvni interakciji, ki jo lahko v tem primeru zapišemo v podobni obliki kot pri elektronih in jedrih.

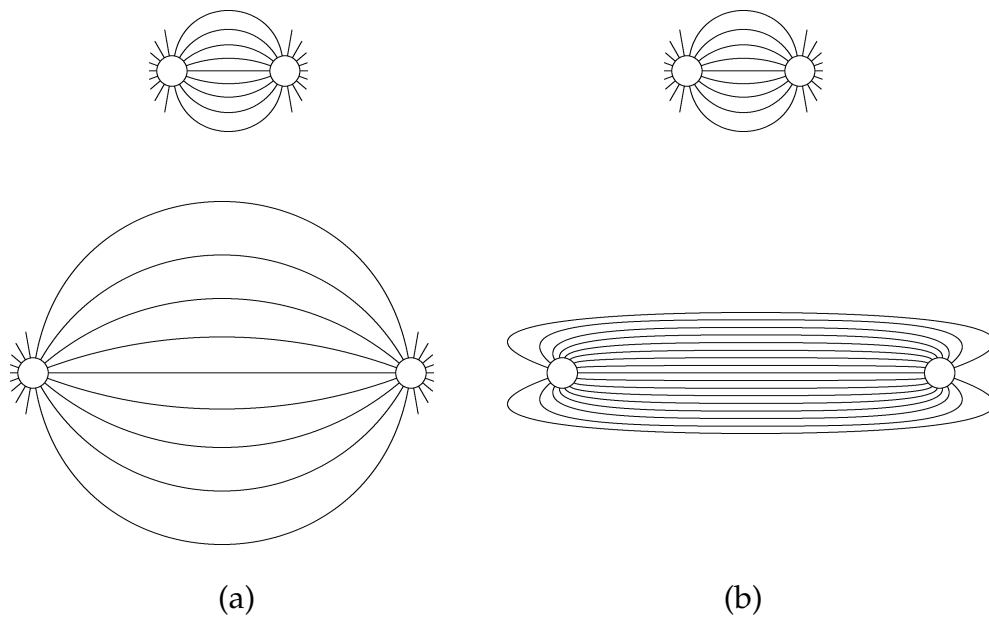
4 Interakcija med kvarki

Po analogiji z elektromagnetnim poljem ter na podlagi rezultatov, ki jih dobimo pri računih na mreži, lahko nazorno prikažemo značilne lastnosti interakcije med kvarki. Predvsem bi radi pojasnili dejstvo, da je interakcija med kvarki na večjih razdaljah močnejša kot na manjših, saj smo pri interakcijah iz makroskopskega in tudi iz atomskega sveta navajeni, da sile in potenciali z razdaljo pojemajo. Pri nazorni razlagi si pomagamo z analogijo s silnicami elektromagnetnega polja. Če na primer razdaljo med dvema električno nabitima delcema povečujemo, se silnice med njima redčijo, saj je število silnic konstantno in sila pojema. Pri gluonskem polju pa je polje lahko samemu sebi izvor, kar pomeni, da silnice lahko rojevajo nove silnice. Med silnicami torej deluje sila. Izkaže se, da je sila privlačna, podobno kot pri dveh vzporednih vodnikih, po katerih tečeta električna tokova v isto smer. Zaradi tega se silnice ne razbežijo po prostoru, temveč ostanejo znotraj nekakšne cevi (glej sliko 4). To pa pomeni, da se sila z razdaljo ne spreminja in da potencialna energija z razdaljo linearno narašča.

Na podlagi navedenih lastnosti lahko zapišemo približno obliko potenciala med kvarkoma. V kvantni kromodinamiki pojem potenciala seveda nima nikakršnega smisla, saj interakcijo med kvarkoma opišemo z izmenjavo gluonov. Kljub temu tak modelski potencial nudi nazorno predstavo in lahko uspešno kvantitativno napove spekter težkih mezonov.

Potencialno energijo zapišimo najprej za primer kvarka in antikvarka, ki sta sklopljena v barvni singlet. Na majhnih razdaljah je potencialna energija podobna coulombski, na večjih pa linearno narašča:

$$V(r) = -\frac{\alpha_s}{r} + \kappa r + V_0, \quad (3)$$



Slika 4: Silnice na majhnih in velikih razdaljah (a) med elektronom in pozitronom, (b) med kvarkom in antikvarkom

V_0 je konstantni prispevek k potencialu; značilni vrednosti konstant pri „coulomb-skem“ in linearnem členu sta $\alpha_s \sim 0.15$ in $\kappa \sim 1 \text{ GeV/fm}$.